

30-0066/001

INSTITUT FÜR BAUSTOFFE, MASSIVBAU UND BRANDSCHUTZ

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BRAUNSCHWEIG

DIREKTOREN: PROF. DR.-ING. DR.-ING. E. h. K. KORDINA · PROF. DR.-ING. F. S. ROSTASY

F O R S C H U N G S B E R I C H T

"Brandverhalten von Stahlbetonbauteilen  
mit Stabbündelbewehrung"

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. K. Kordina

Dipl.-Ing. J. Wiese

Prof. Dr.-Ing. W. Klingsch

- März 1983 -

**B I B L I O T H E K**  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig  
Beethovenstraße 52  
D-3300 Braunschweig

Die Arbeiten wurden durchgeführt im Auftrag des Ministers für  
Landes- und Stadtentwicklung des Landes Nordrhein-Westfalen  
(VB 1 - 72.02 - Nr. 145/80).

# BAUFORSCHUNG

DES MINISTERS FÜR LANDES-U. STADTENTWICKLUNG DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

## Kurzfassung des Abschlußberichtes.

### Forschungsthema:

Brandverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Stabbündel-Bewehrung

Kurztitel: Stabbündel im Brand

Forschende Stelle: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig

Datum der Vergabe: 3. Juli 1980

### 1. Ziel der Untersuchung.

Der baupraktische Vorteil einer Stabbündelbewehrung entsprechend DIN 1045 Abschnitt 18 wird durch die Einschränkungen der DIN 4102 Teil 4 erheblich vermindert.

Es war zu klären, ob durch wirklichkeitsnähere Beurteilungskriterien zum Erwärmungsverhalten von Stabbündeln innerhalb von Betonquerschnitten ein wirtschaftlicher Einsatz dieser Bewehrungsart unter Beibehaltung der üblichen brandschutztechnischen Sicherheitsforderungen ermöglicht werden kann.

2  
Wicht.  
belegt!

## 2. Ergebnis der Untersuchung.

3  
Nicht belegt

Die Untersuchungen ergaben, daß eine wesentlich wirtschaftlichere Bemessung von stabbündelbewehrten Stahlbetonbauteilen möglich ist.

Das Ergebnis der Untersuchungen kann folgendermaßen zusammengefaßt werden:

Werden die Achsabstände  $u$  und  $u_s$  nicht wie bisher auf den Schwerpunkt des Bündels, sondern auf den Schwerpunkt desjenigen Einzelstabes des Bündels bezogen, der planmäßig den geringsten Abstand zur betreffenden beflamten Oberfläche hat, darf die Mindeststabzahl  $n$  vorab um 1 vermindert werden.

*Welche sind das?*

Die bisherigen Einschränkungen der DIN 4102 Teil 4 entfallen somit, und die brandschutztechnische Bemessung von stabbündelbewehrten Stahlbetonbauteilen erfolgt im wesentlichen wie für übliche Stahlbetonbauteile.

*ohne Änderung wäre das so, aber mit den vorgelegten Änderungen?*

### 3. Folgerungen aus den Untersuchungsergebnissen.

#### 3.1 Welche Empfehlungen können für die weitere Normungsarbeit bzw. hinsichtlich Ergänzung oder Änderung bestehender Normen, Richtlinien und dgl. gegeben werden ?

Die vorgeschlagenen Ergänzungen der entsprechenden Bemessungsvorschriften der DIN 4102 Teil 4 sollten möglichst bald bauaufsichtlich zugelassen werden.

#### 3.2 Erscheinen weitere Arbeiten zur Abklärung offengebliebener Fragen, die mit den durchgeführten Untersuchungen im Zusammenhang stehen, erforderlich und welche Arbeiten sind besonders vorrangig ?

Der Fragenkomplex kann als abgeschlossen angesehen werden.

#### 3.3 Welche Folgerungen können für die Baupraxis aus den Untersuchungsergebnissen gezogen werden; hierbei ist auf bestehende Richtlinien besonders Rücksicht zu nehmen ?

Sobald die Anwendung der vorgeschlagenen Ergänzungen der Bemessungsvorschriften nach DIN 4102 Teil 4 für Stabbündel zugelassen ist, kann mit einem verstärkten Einsatz von Stabbündelbewehrungen und damit mit einer Steigerung der Wirtschaftlichkeit im Stahlbetonbau gerechnet werden.

*Wie das ?*

## Inhaltsverzeichnis

Seite

<u>Einleitung</u> . . . . .	1
<u>1. Erwärmungsversuche</u> . . . . .	2
1.1 Allgemeines . . . . .	2
1.2 Konzeption und Aufbau der Probekörper . . . . .	3
1.3 Versuchsdurchführung . . . . .	6
1.4 Meßergebnisse . . . . .	7
1.5 Rechnerische Begleitung . . . . .	7
1.6 Auswertung . . . . .	9
<u>2. Bauteilversuche</u> . . . . .	17
2.1 Entwurf der Probekörper . . . . .	17
2.1.1 Grundgedanke . . . . .	17
2.1.2 Entwurf . . . . .	17
2.1.3 Probekörper: Querschnitt, Bewehrung, Thermoelemente . . .	21
2.2 Ermittlung der zulässigen Belastung . . . . .	21
2.3 Versuche . . . . .	24
2.3.1 Allgemeine Beschreibung . . . . .	24
2.3.2 Versuchsergebnisse . . . . .	25
2.3.3 Auswertung . . . . .	26
2.3.4 Zusammenfassung . . . . .	28
<u>3. Gesamtergebnis</u> . . . . .	31
3.1 Ergebnis der Untersuchungen . . . . .	31
3.2 Abschließende Empfehlungen . . . . .	32
3.3 Zusammenfassung . . . . .	38
<u>4. Literaturangaben</u> . . . . .	39
ANLAGEN mit Anlagenverzeichnis . . . . .	40

## E i n l e i t u n g

Bei Brandbeanspruchung von Beton-Balkenquerschnitten verlaufen die Isothermen

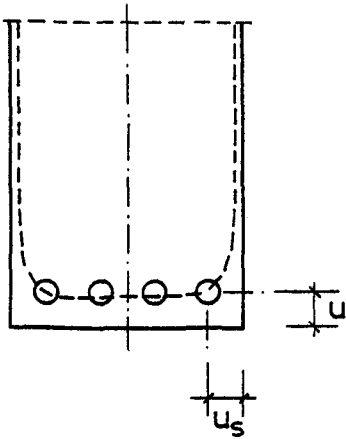


Bild 1.1:

gekrümmt. Die Bewehrungsstäbe werden demgegenüber in einer oder mehreren horizontalen Lagen angeordnet. DIN 4102 Teil 4 berücksichtigt die stärkere Erwärmung der Querschnittsecken und damit der außenliegenden Bewehrungsstäbe dadurch, daß bei einlagiger Bewehrung eine gegenüber dem unteren Achsabstand der Bewehrung  $u$  ein vergrößerter seitlicher Achsabstand  $u_s$  gefordert wird. Bei gleichzeitiger Einhaltung einer Mindeststabzahl  $n$ , d. h. einer ausreichenden Anzahl von Stäben in dem weniger erwärmten Mittelnbereich des Querschnitts, wird so gewährleistet, daß die mittlere Erwärmung der Be-

wehrung die zulässige Grenze nicht überschreitet. Bei mehrlagiger Bewehrung wird der Einfluß der schnelleren Eckenerwärmung vernachlässigt.

Die Neufassung von Abschnitt 18 der DIN 1045 erlaubt nun die Anordnung von Stabbündelbewehrungen, bestehend aus bis zu 3 Einzelstäben. Da über solche Bewehrungskonzentrationen noch keine brandschutztechnischen Erfahrungen vorliegen, werden in DIN 4102 Stabbündel wie Einzelstäbe behandelt, wobei die Maße  $u$  und  $u_s$  auf den Schwerpunkt des jeweiligen Stabbündels zu beziehen sind.

Die Einhaltung der Mindeststabzahl nach DIN 4102 behindert bei Balken mit brandschutztechnischen Anforderungen die Verwendung von Stabbündeln beträchtlich, weil sie bei gleichzeitiger Einhaltung der Forderungen von DIN 1045 oftmals konstruktiv nicht mehr in der Querschnittsbreite bzw. zwischen den Bügelschenkeln unterzubringen sind. *hat das wirklich so?*

Es war daher zu untersuchen, ob, ggf. unter bestimmten Einschränkungen, die Mindest-Stabbündelzahl gegenüber der Mindeststabzahl verringert werden kann.

Weiter war zu prüfen, ob es zulässig ist, die mittlere Temperatur eines Stabbündels mit der Temperatur seines Schwerpunkts gleichzusetzen. Korrekt wäre dieser Ansatz nur bei linearem Verlauf der Temperaturgradienten.

Es wurden eine Reihe von Erwärmungsversuchen und zur Bestätigung der gewonnenen Ergebnisse weitere drei Versuche an Bauteilen unter mechanischer Beanspruchung (Gebrauchslast) durchgeführt.

## 1. Erwärmungsversuche

### 1.1 Allgemeines

Zur Klärung des Erwärmungsverhaltens der Einzelstäbe von Stabbündel-Bewehrungen in Betonquerschnitten sind balkenförmige Versuchskörper hergestellt worden. Nach einer etwa dreimonatigen Lagerungszeit wurden sie einer Beflammung gemäß der Einheits-Temperaturzeit-Kurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2, Abschn. 6.2.4 unterworfen (s. Bild 1.2).

Als Belastung wirkte nur das Eigengewicht.

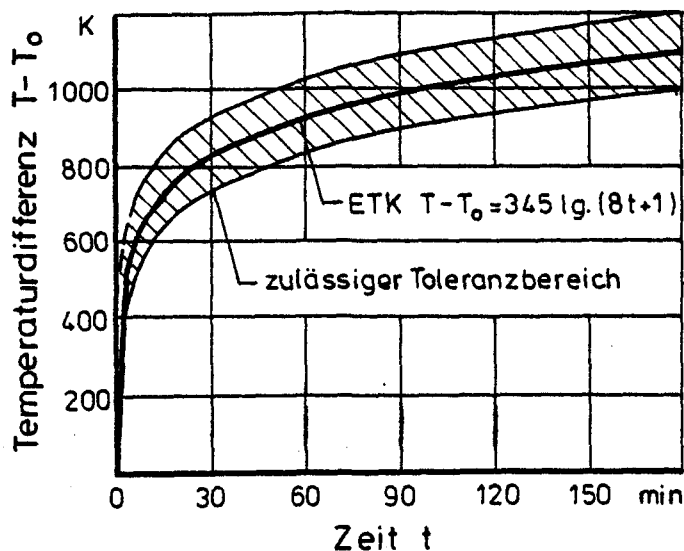


Bild 1.2: Einheits-Temperaturzeit-Kurve (ETK) nach DIN 4102 Teil 2 [4]

Im Versuchsprogramm wurden folgende Parameter variiert:

- a) Betondeckung der Stabbündel,
- b) Form der Stabbündel,
- c) Durchmesser der Einzelstäbe innerhalb eines Stabbündels,
- d) Anordnung der Stabbündel im Betonquerschnitt,

- e) Form des Betonquerschnitts (Verhältnis  $b/h$ ),
- f) Größtkorn des Betons.

Die Temperaturen wurden mit NiCr-Ni-Thermoelementen direkt an der Stahloberfläche an verschiedenen Punkten der Einzelstäbe gemessen und in 2-Minuten-Abständen aufgezeichnet. Sie erlauben Aussagen über die Temperaturentwicklungen der Stabbündel.

Mit einem Computerprogramm [1] ermittelte Temperaturverläufe stimmen gut mit den Meßwerten der Erwärmungs- und Traglastversuche überein. Das Rechenprogramm bietet damit die Möglichkeit, Erwärmungsversuche weitgehend durch Rechnungen zu ersetzen. Der Schwerpunkt dieses Teils der Arbeit liegt aber auf der versuchsmäßigen Klärung des Erwärmungsverhaltens von Stabbündeln.

### 1.2 Konzeption und Aufbau der Probekörper

An den 5 jeweils 5,00 m langen und 40 cm hohen Stahlbetonbalken wurde der mittlere Bereich von 1,80 m Länge in 3 unterschiedlich bewehrte Abschnitte à 60 cm unterteilt. Dadurch standen für die Variation der Versuchsparameter insgesamt 15 Querschnitte zur Verfügung (siehe Tabelle 1, S. 5), Querschnittsdarstellung: Anlagen 1.2.2.a ÷ 1.2.2.d).

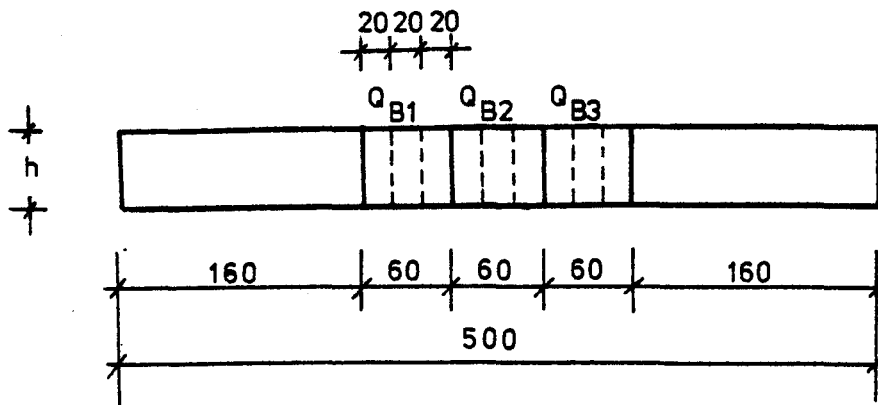


Bild 1.3: Balken mit 3 Meßbereichen und je 2 Meßquerschnitten

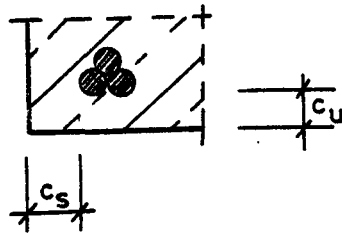


Bei der Querschnittsbezeichnung bedeutet der 1. Index die Nummer des Balkens (1 - 5) und der 2. Index die Nummer des Meßbereichs (1 - 3), z. B.: Q 23 = 2. Balken, 3. Querschnitt (= Meßbereich), siehe Bild 1.3.

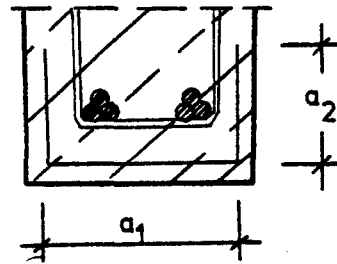
### Querschnittsbeschreibung

Erläuterung der Bezeichnungen:

Betonüberdeckung  
 $c_u/c_s$



Länge der  
Schutzbewehrung  $a_1/a_2$



Bündeltyp - Kennung: n, m

n: Form:  = 1,  = 2,  = 3,  = 4,  = 5

m: Durchmesser: ..., 0 = gleiche  $\emptyset$  im Bündel  
..., 1 = ungleiche  $\emptyset$  im Bündel

Beispiel: Bündeltyp 3,1 - Form 3, unterschiedliche  
Stabdurchmesser

Tabelle 1:

Querschnitt	h [cm]	b [cm]	Lagen	Bündel- typ [n,m]	Ø [mm]	c <sub>u</sub> [mm]	c <sub>s</sub> [mm]	Schutzbewehrung Matte	a <sub>1</sub> [cm]	a <sub>2</sub> [cm]	Größt- korn [mm]
Q 11	40	20	1	3,0 4,0	12	25	33	-	-	-	16
Q 12	40	20	2	3,0 4,0	12	25	33	-	-	-	16
Q 13	40	20	1	3,0	12	25	33	-	-	-	16
Q 21	40	20	1	3,0 4,0	12	25	33	-	-	-	8
Q 22	40	20	2	3,0 4,0	12	25	33	-	-	-	8
Q 23	40	20	1	3,0	12	25	33	-	-	-	8
Q 31	38	34	1	2,0 4,0	22	30	34	-	-	-	16
Q 32	38	34	2	1,0 2,0 4,0	22	30	34	-	-	-	16
Q 33	40	40	1	2,0 4,0	22	50	64	Q 131	36	36	16
Q 41	40	30	1	4,0	18	25	42	-	-	-	16
Q 42	40	30	2	3,0 4,0	18	25	42	-	-	-	16
Q 43	40	30	1	4,0	18	55	62	Q 131	26	26	16
Q 51	40	20	1	2,0 4,1	10 18	27	27	-	-	-	16
Q 52	40	20	1	2,0 4,1	10 18	27	27	-	-	-	16
Q 53	40	20	1	5,0	18	27	27	-	-	-	16

In den Drittelpunkten der Meßbereiche sind 2 Meßquerschnitte festgelegt, so daß ausreichend viele Meßpunkte angeordnet werden können.

Da die Bewehrung stets symmetrisch zur Balkenlängsachse verlegt ist, stehen in jedem Meßbereich 4 Orte zur Erfassung der Temperaturen der äußeren Stäbe und 2 Orte für die Temperaturen an den Bündeln in Querschnittsmitte zur Verfügung, die zu Kontrollmessungen genutzt werden können. Insgesamt werden fast 300 Temperaturmeßstellen benutzt, so daß Meßfehler erkannt und Fehlmessungen eliminiert werden können. Die hierzu verwendeten NiCr-Ni-Thermoelemente wurden direkt an die Bewehrungsstäbe angeschweißt.

Am Balken 1 wird exemplarisch die Anordnung und Bezeichnung der Thermoelemente erklärt (siehe Anlagen 1.2.1a - 1.2.1c).

### 1.3 Versuchsdurchführung

Die Balken wurden beiderseits frei drehbar und mit freier Längsverschieblichkeit auf den Wänden eines Deckenbrandhauses aufgelagert. Die Stützweite betrug 4,75 m, die beflamnte Länge ca. 4,20 m. Die Brandhausabdeckung erfolgte mittels Abdeckplatten parallel zu den Balken. Die Fugen wurden mit Mineralfaserplatten so abgedichtet (Anlage 1.3), daß sich die Balken unbehindert durchbiegen konnten. Die Beheizung des Brandhauses erfolgte gemäß der ETK nach DIN 4102, Teil 2, Abschnitt 6.2.4 durch Verbrennung von leichtem Heizöl EL nach DIN 51 603. Die Flammenachsen lagen parallel zu den Balkenlängsachsen.

Die Temperaturen der Stäbe wurden in 2-Minuten-Abständen gemessen und sowohl auf Lochstreifen als auch als Druckerprotokoll ausgegeben.

Um das wegen des hohen Feuchtigkeitsgehaltes der Prüfkörper große Abplatzrisiko zu verringern, mußten die Balken vor den Versuchen ca. 5 Stunden bei einer konstanten Brandraumtemperatur von  $> 100^{\circ}\text{C}$  trockengeheizt werden. Dadurch kann im Temperaturverlauf (Anlagen 1.4.1) nur geringes Verhalten der Erwärmung bei  $100^{\circ}\text{C}$  infolge Wasserverdampfung auftreten.

Tabelle 2: Feuchtigkeitswerte (Gew.-%)

Balken	Alter in Tagen	<u>vor</u> dem Trockenheizen Feuchteproben		<u>nach</u> dem Trockenheizen	
		Rand	Mitte	Feuchte- proben	Bauteil- rand
B 1	131	4,55 %		0,79 %	2,20 % <sup>+) </sup>
B 2	110	6,00 %	6,08 %	0,27 %	0,66 % <sup>++) </sup>
B 3	131	5,84 %		1,01 %	2,76 % <sup>+) </sup>
B 4	124	3,81 %	4,14 %	0,31 %	0,63 % <sup>++) </sup>
B 5	124	3,89 %	4,45 %	0,34 %	0,62 % <sup>++) </sup>

+ ) Messung an der nicht beflamnten Balkenstirnseite

++) Messung an der beflamnten Balkenunterseite

#### 1.4 Meßergebnisse

In einem ersten Schritt sind Temperatur-Zeit-Kurven für alle Meßstellen gezeichnet und anschließend für alle Meßstellen eines Stabes innerhalb eines Meßquerschnitts zu Streubändern zusammengefaßt worden. Die Streubreite der Meßwerte beträgt ca. 30 K (siehe Anlage 1.4.1.a - 1.4.1.c).

Für die weitergehenden Auswertungen sind die Temperaturdifferenzen zwischen den einzelnen Stäben der Bündel wichtig. Die Abweichungen der Stabtemperaturen von der mittleren Temperatur des Gesamtbündels sind über der Zeit in den Anlagen 1.4.2.a - 1.4.2.o dargestellt. Sie bilden die Grundlage für die in Kapitel 1.6 zusammengestellten Erkenntnisse.

#### 1.5 Rechnerische Begleitung

Das für die rechnerische Temperaturermittlung verwendete Programm [1] arbeitet nach der Methode der Finiten Elemente mit einer Zeitschritt-Integration. Die verwendeten Stoffgesetze können temperaturabhängig eingegeben werden.

Der Verlauf der zur Temperaturleitzahl  $a$  zusammengefaßten, der Rechnung zugrunde liegenden, jeweils temperaturabhängigen thermischen Stoffparameter

- Wärmeleitzahl  $\lambda$
- Dichte  $\rho$
- spez. Wärmekapazität  $c_p$

ist in Bild 1.4 dargestellt [5]:

$$a(T) = \frac{\lambda(T)}{c_p(T) \cdot \rho(T)} \quad (1)$$

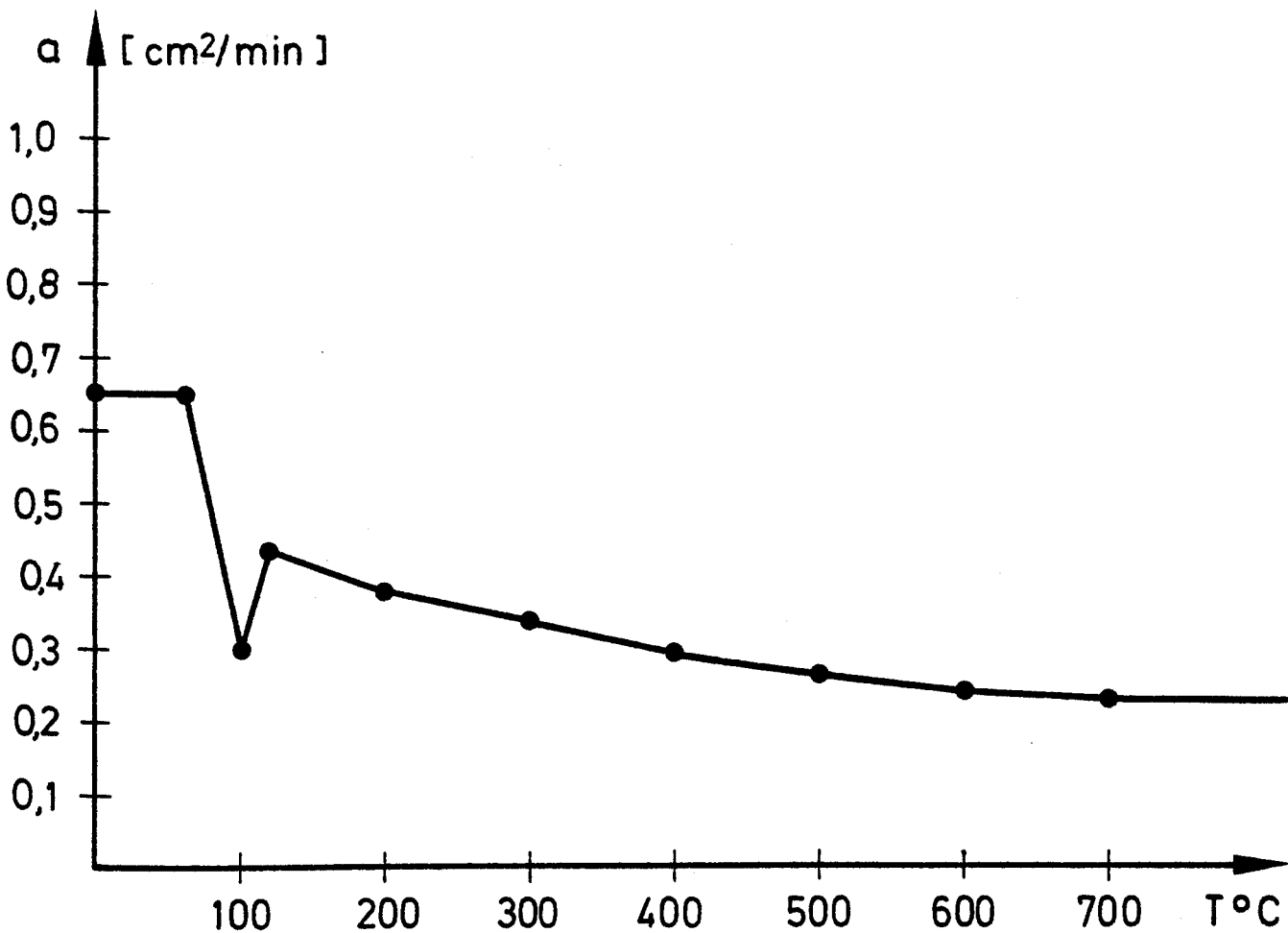


Bild 1.4: Temperaturleitzahl für quarzitischen Normalbeton

Die Rechenergebnisse werden als Temperaturzeitkurven für beliebige Knotenpunkte des untersuchten Querschnitts oder als Isothermenbild für den gesamten untersuchten Bereich eines Querschnitts für vorgegebene Zeitpunkte ausgegeben.

Da sich die Bewehrungsstab-Temperaturen mit ausreichender Genauigkeit wie die Temperaturen des entsprechenden Punktes im reinen Betonquerschnitt entwickeln - lediglich in der Stahlunggebung gibt es geringfügige Abweichungen -, wurde bei den Vergleichsrechnungen auf die Simulierung der Stahleinlagen verzichtet [7].

Für den Balken 1 ( $b/d = 20/40$  cm) sind in den Anlagen 1.5.a - 1.5.b die berechneten Temperaturzeitbereiche für Punkte in der unmittelbaren Umgebung der planmäßigen Lage der Stabachsen dargestellt.

### 1.6 Auswertung

Liegen Stabbündel in den randnahen Bereichen eines Betonquerschnitts, so erwärmen sich die einzelnen Bewehrungsstäbe wegen der gekrümmten Temperaturgradienten unterschiedlich schnell, und die mittlere Bündeltemperatur entspricht nicht der Temperatur im Bündelschwerpunkt.

Wie im folgenden gezeigt wird, sind die Temperaturabweichungen abhängig von der Stabanzahl im Bündel, den Stabdurchmessern und von der Lage im Querschnitt.

Die Meßwerte zeigten teilweise, daß bei Eckbündeln, welche sich in die Bügelkrümmung schmiegen, eine Veränderung der zu erwartenden Stab-Temperatur-Zuordnung einstellen kann (vgl. Bild 1.5).

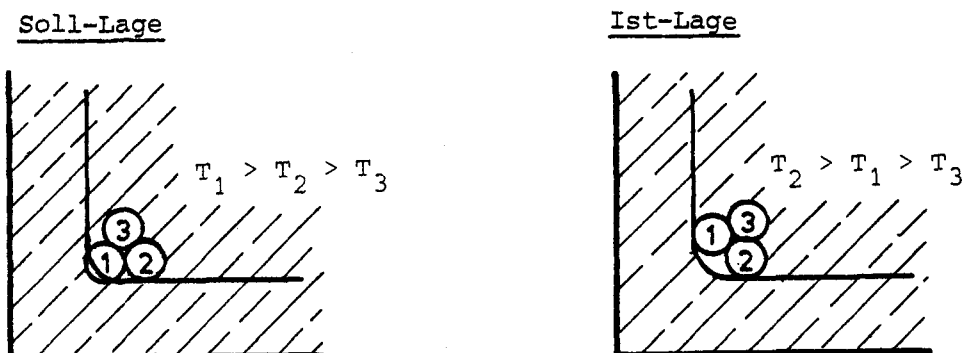


Bild 1.5: Lage von Stabbündeln in der Querschnittsecke

Die "Soll-Lage" ist nicht einzuhalten, da der Biegeradius der Bügel größer ist als der Einzelstabsradius.

Die mittlere Bündeltemperatur wurde als gewichtetes Mittel berechnet:

$$T_{m,Bü} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i T_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

$n$  = Zahl der Stäbe

$A$  = Stabquerschnittsfläche

$T$  = Temperatur der Stäbe

Die Einzelstabtemperaturen streuen mit  $\pm \Delta T$ , je nach Lage, um diesen Mittelwert  $T_{m,Bü}$ .

Es ist eine Anfangsphase erkennbar, während der sich diese Temperaturdifferenzen aufbauen; anschließend bleiben die Temperaturdifferenzen konstant oder fallen bei kleinen Stabdurchmessern und/oder geringer Betondeckung wieder ab.

Vereinfacht lässt sich dieses Verhalten mit einer bilinearen  $\Delta T$ - $t$ -Funktion qualitativ beschreiben (Bild 1.5 a).

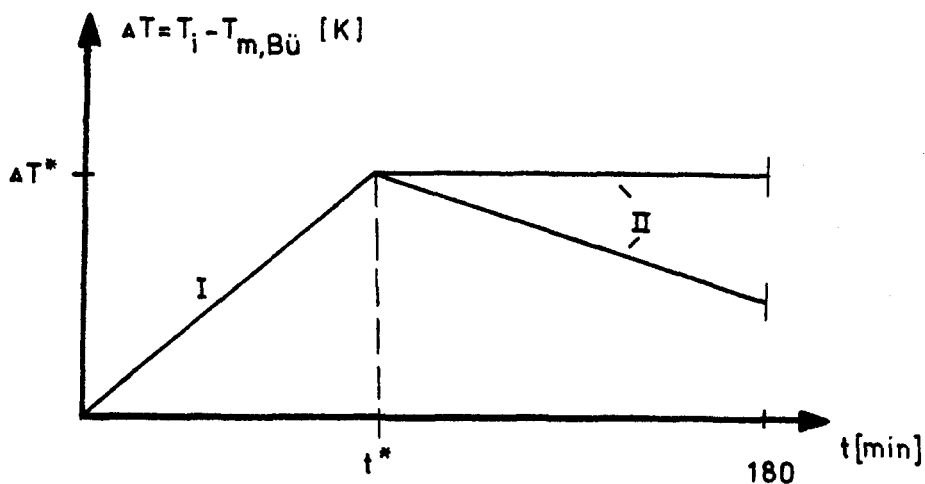
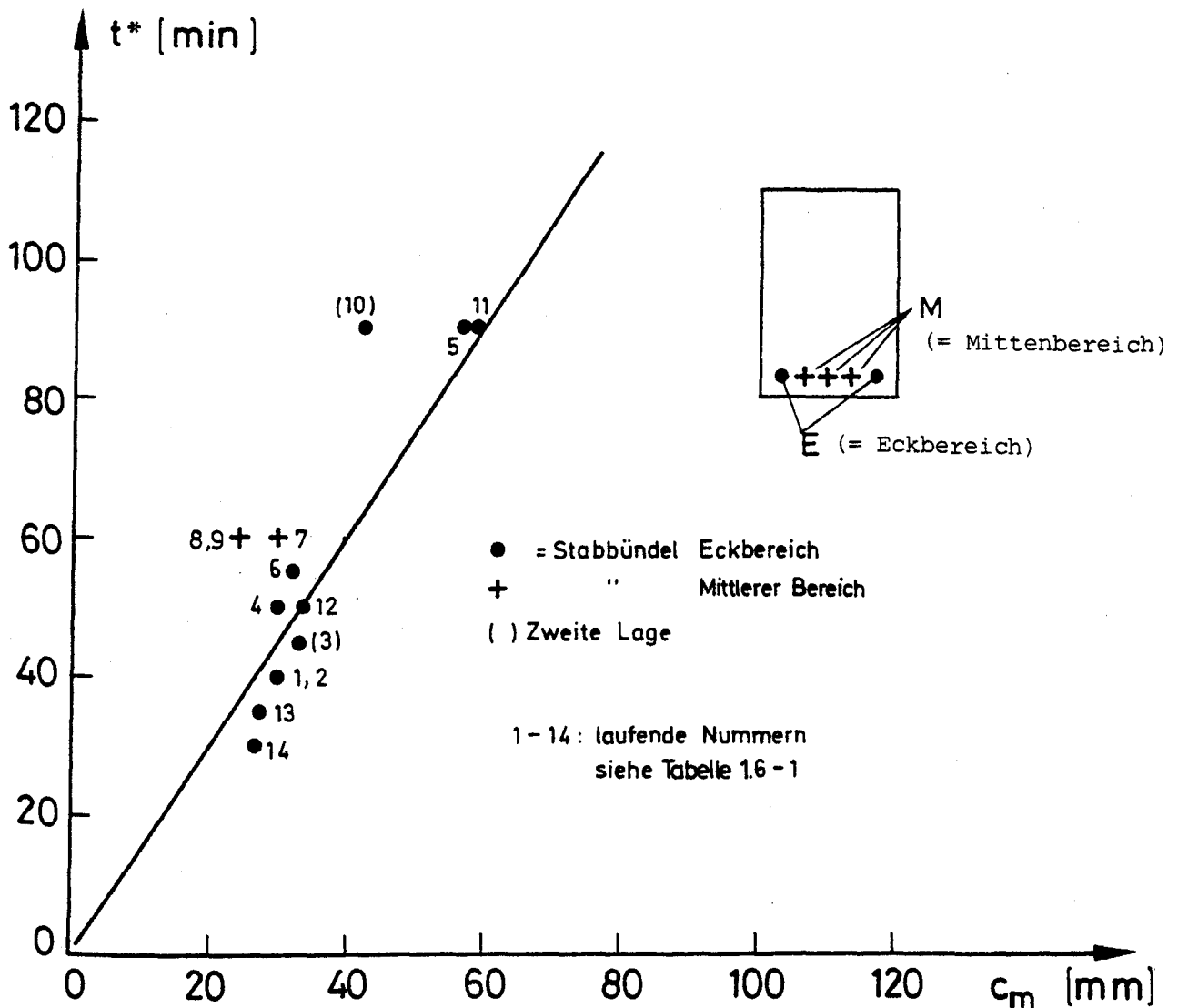


Bild 1.5 a: Schema der Entwicklung von Temperaturdifferenzen in Stabbündeln

In den Bildern 1.5 b und 1.5 c sind die Versuchsergebnisse zusammengefaßt.  
Für den Zeitpunkt des Erreichens der max. Temperaturdifferenzen innerhalb der Stabbündel wird ein linearer Zusammenhang mit der mittleren Betondeckung  $c_m$  sichtbar ( $t^*$ - und  $\Delta T^*$ -Definitionen siehe Bild 1.5 a).

$$c_m \text{ (Eckbereich)} = \frac{1}{2} (c_u + c_s) \quad (3.1)$$

$$c_m \text{ (Randbereich)} = c_u \quad (3.2)$$



**Bild 1.5b:** Zeitpunkt  $t^*$  des Erreichens maximaler Temperaturdifferenzen in den Stäben eines Bündels in Abhängigkeit von der Betondeckung  $c_m$  des Bündels



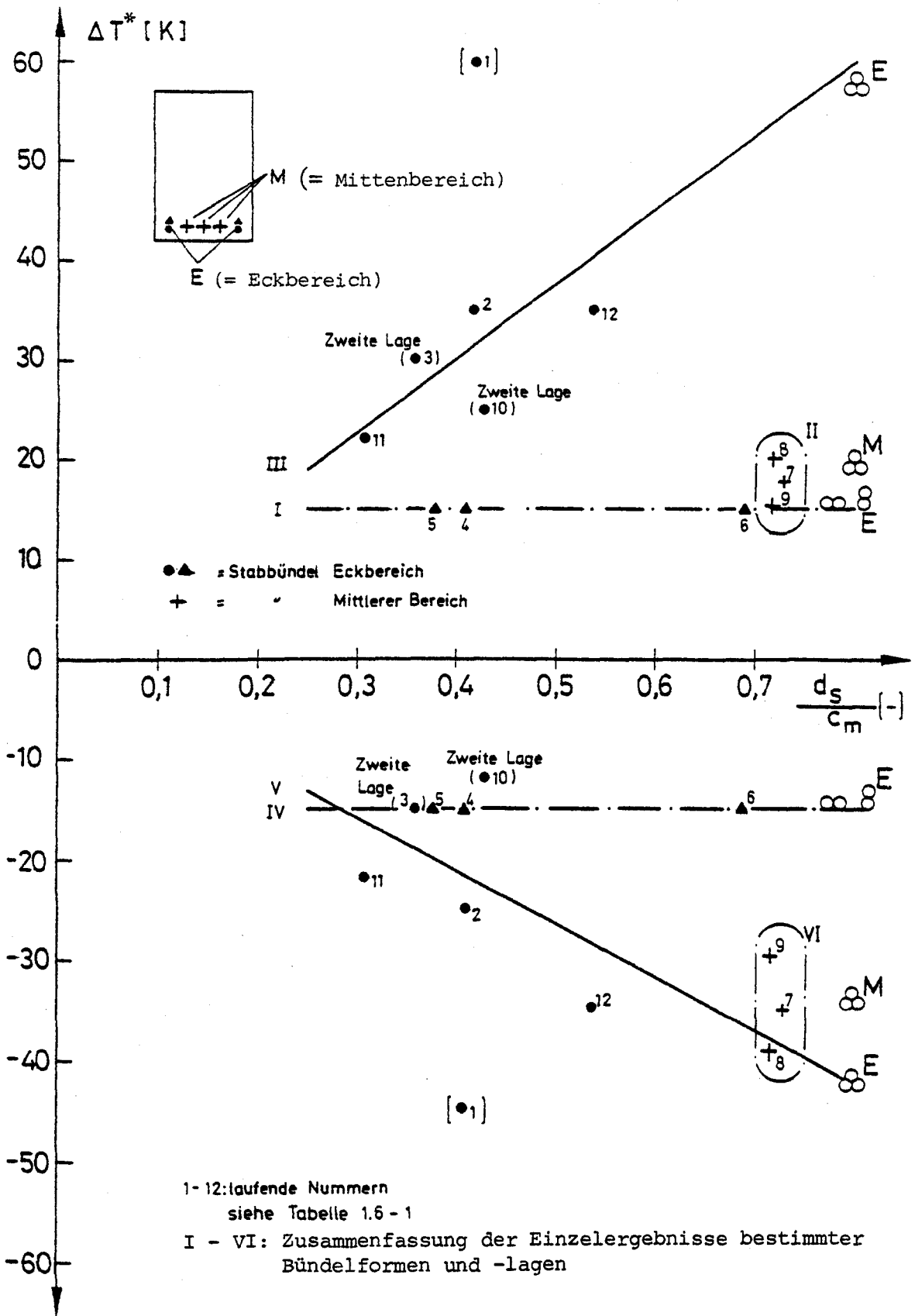


Bild 1.5 c: Abhängigkeit der max. Temperaturdifferenzen  $\Delta T^*$  zwischen der mittleren Bündeltemperatur gemäß (2) und der Temperatur des wärmsten bzw. kältesten Einzelstabes vom Verhältnis der Einzelstabdurchmesser  $d_s$  zur mittleren Betondeckung  $c_m$  nach (3.1) bzw. (3.2)

Tabelle 1.6-1:

Nr.	Bündel	c <sub>m</sub> [mm]	u <sub>m</sub> [mm]	t <sub>1</sub> [min]	ΔT <sub>max</sub> [K]	ΔT <sub>min</sub> [K]	∅ <sub>Stab</sub> [mm]	d <sub>sv</sub> [mm]	∅ <sub>Stab</sub> /c <sub>m</sub> [-]	Lage 1 = unten
1	Q 11 E <sup>1)</sup>	29	40	40	60	- 45	12	20,8	0,41	1
2	Q 12 E	29	40	40	35	- 25	12	20,8	0,41	1
3	Q 12 E	33	45	50	30	- 15	12	20,8	0,36	2
4	Q 13 E	29	38	50	15	- 15	12	17,0	0,41	1
5	Q 33 E	57	73	90	15	- 15	22	31,1	0,38	1
6	Q 31 E	32	48	55	15	- 15	22	31,1	0,69	1
7	Q 31 M <sup>1)</sup>	30	47	60	18	- 35	22	38,1	0,73	1
8	Q 41 M	25	39	60	20	- 40	18	31,2	0,72	1
9	Q 42 M	25	39	60	15	- 30	18	31,2	0,72	1
10	Q 42 E	42	60	90	25	- 12	18	31,2	0,43	2
11	Q 43 E	58,5	75	90	22	- 22	18	31,2	0,31	1
12	Q 41 E	33,5	50	50	35	- 35	18	31,2	0,54	1
13	Q 51 E	27,5	41	35	35	- 20	-	-	-	-
14	Q 52 E	27	39	30	20	- 50	-	-	-	-

1) E = Eckbereich  
M = Mittenbereich

Die maximalen Temperaturdifferenzen zwischen der mittleren Bündeltemperatur und den wärmsten bzw. den kältesten Stäben ( $\Delta T = T_i - T_{m,Bu}$ ) sind im Bild 1.5c über dem Verhältnis  $d_s/c_m$  aufgetragen. Der Wert der mittleren Betonüberdeckung  $c_m$  bestimmt sich nach Gl. (3) auf Seite 11,  $d_s$  ist der Einzelstabdurchmesser des Bündels.

Bei Zweierbündeln liegt die mittlere Temperatur natürlich genau zwischen den Temperaturen der beiden Einzelstäbe. Unterschiedliche Temperaturen können bei nebeneinanderliegenden Einzelstäben nur in den Querschnittsecken auftreten.

Für Zweiereckbündel hat sich für jedes geprüfte Verhältnis  $d_s/c_m$  ein max  $\Delta T_1$  von ca. ± 15 K herausgestellt (I und IV in Abb. 1.5.c).

Bestehen Eckbündel aus 3 Einzelstäben, so wärmt sich ein Stab davon deutlich stärker auf als die beiden anderen, die die mittlere Temperatur des Gesamtbündels nach unten drücken. Erkennbar wird dies im Bild 1.5.c (Werte III und V), dadurch, daß  $|- \Delta T^*| < |+ \Delta T^*|$ . Die Temperaturdifferenz ±  $\Delta T^*$  wächst mit dem Verhältnis  $d_s/c_m$ .

Liegen Dreierbündel am unteren Rand, so erwärmen sich zwei Stäbe deutlich schneller als der dritte (II und VI nach Bild 1.5.c). Darum ist  $|- \Delta T^*| > |+ \Delta T^*|$ . Diese Tatsache wird von den Bereichen II und VI in Bild 1.5.c bestätigt.

Bild 1.5 d zeigt die mittleren Temperaturen von Eckbündeln unterschiedlicher Lage und Form bei Verwendung verschiedener Einzelstabdurchmesser im Vergleich zur mittleren Stahltemperatur eines mit 3 Einzelstäben nach DIN 4102 bemessenen Querschnitts.

Die Auswertung läßt sich folgendermaßen zusammenfassen:

Bei Einhaltung der geltenden Bestimmungen nach DIN 4102 Teil 4 liegt die mittlere Temperatur von Stabbündeln in beflamnten Querschnittsecken höher als die gemittelte Temperatur aller entsprechenden Einzelstäbe einer einlagigen Einzelstabbewehrung (Kurve 1 in Bild 1.5.d). Sie ist sogar deutlich größer als die Temperatur des Eckstabes eines nur mit Einzelstäben bewehrten Querschnitts (Einzelstab:  $T_{max} = 525^\circ C$ ).

Die Forderung der DIN 1045 nach einer Betondeckung  $c_{sb} \geq 2 \text{ cm}$  und  $c_{sb} \geq d_{sv}$  kann den Gebrauch kleiner  $u_s$  gemäß DIN 4102 verhindern. Tabelle 1.5-2 zeigt die kleinstmöglichen  $u_s$  für Stabbündel, die aus 3 Einzelstäben gleicher Durchmesser bestehen.

Tabelle 1.5-2:

Einzelstab- durchmesser eines Dreierbündels $d_s$ [mm]	10	12	14	16	18	20	22	25	28
Kleinstmögli- cher seitlicher Achsabstand $u_s$ [mm] (DIN 1045)	35	35	40	45	50	55	60	65	75

Bündel mit  $d_s > 20 \text{ mm}$  der Kurve 1 in Bild 1.5 d sind nicht mehr zugelassen, da die Querschnittsbreite von 20 cm nicht ausreicht, um die Bewehrung gemäß DIN 1045 mit dem Mindeststababstand zwischen den Bündeln aufzunehmen.

*Superfide  
wäre eine Seitenbewehrung zur Hauptbewehrung  
erforderlich wegen  $d_s > 20 \text{ mm}$ .*

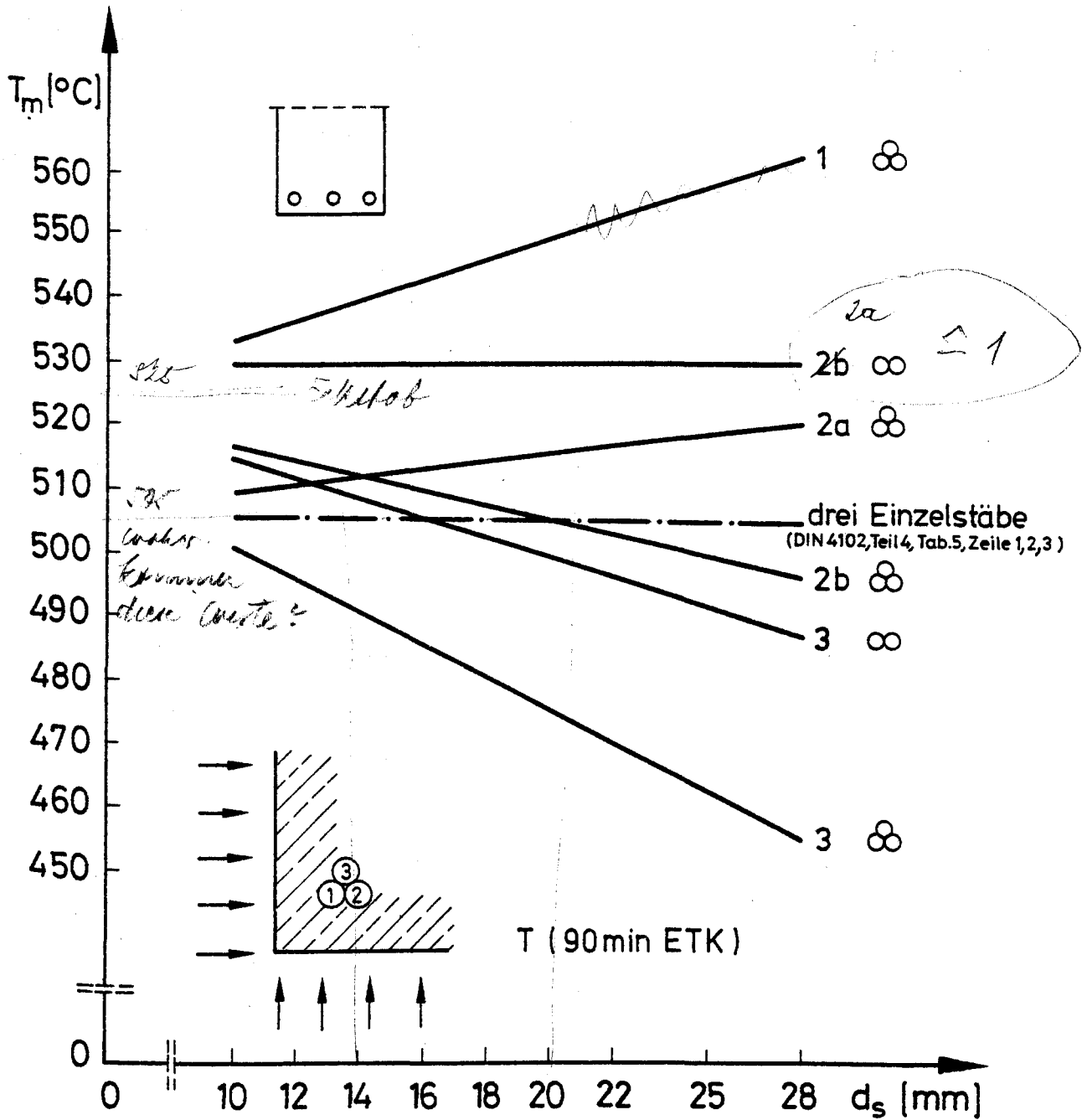
Die mittlere Temperatur von Eckbündeln sinkt wesentlich, wenn der seitliche Achsabstand  $u_s$  nicht auf den Schwerpunkt des Gesamtbündels, sondern auf den Schwerpunkt des äußersten Stabes bezogen wird. Es wird so erreicht, daß die Bündel ohne Verlust an statischer Höhe aus dem Eckbereich seitlich herausreichen (Bild 1.5-d, Kurve 2a).

Bezieht man sowohl  $u$  als auch  $u_s$  der DIN 4102 auf den Schwerpunkt des äußersten Einzelstabes eines Eckbündels und verlegt man das Bündel damit noch weiter in das Querschnittsinnere, so liegt die mittlere Temperatur von Eckbündeln sogar unter der mittleren Temperatur einer einlagigen Einzelstabbewehrung (Bild 1.5-d, Kurve 3).

Auf das Erwärmungsverhalten von Stabbündeln hat das Größtkorn des Betons keinen Einfluß; die Querschnittsform wirkt sich wie bei Einzelstabbewehrung aus.

Die Versuchsparameter  $a \div d$  von Kap. 1.1 sind oben besprochen.

numerisch ermittelt!



Balkenbreite  $b = 200$  mm  
 $u = 45$  mm  $u_s = 55$  mm

*F90 Einfeldbalken*

Kurve	Bezugsschwerpunkt für	
	$u$	$u_s$
1	Bündel	Bündel
2a	Bündel	Stab ①
2b	Stab ①	Bündel
3	Stab ①	Stab ①

Bild 1.5 d: mittlere Temperatur  $T_{m,Bu}$  von Eckstabbündeln verschiedener Ausbildung nach  $t = 90$  min (ETK)

## 2. Bauteilversuche

### 2.1 Entwurf der Probekörper

#### 2.1.1 Grundgedanke

Mit den Bauteilversuchen sollte geprüft werden, ob die Temperaturgradienten innerhalb der Stabbündel (Temperaturunterschiede zwischen den einzelnen Stäben der Bündel) ausreichen, um eine gegenüber der herkömmlichen Bewehrungsführung mögliche erhöhte Stahlkonzentration in der 1. Lage und insbesondere in den thermisch stärker belasteten Querschnittsecken zuzulassen. Die kühleren Stäbe der Bündel müßten dann die Funktion der Mittenstäbe einer Einzelstabbewehrung übernehmen.

Es wurden 2 Versuche an Balken und ein Versuch an einer Stütze durchgeführt, um sowohl das Versagen der Bündel in der rechnerischen Zugzone als auch in der rechnerischen Druckzone bei unterschiedlichen Bündelformen beobachten zu können.

#### 2.1.2 Entwurf

Die Bauteile sollten die Feuerwiderstandsklassen F 60 bzw. F 90 nach DIN 4102 erreichen. Folgende Forderungen der DIN 4102 Teil 4 waren zu untersuchen, insbesondere:

- a) Sind Bündel wie ein Einzelstab zu behandeln,
- b) ist auch für Bündel das Mindeststabstahlkriterium anzuwenden?

##### 2.1.2.1 Balken SB-1 (s. Anl. 2.1-1)

Mit dem Balken 1 sollte überprüft werden, ob die nach DIN 4102 Teil 4, Tabelle 5, Fußnote 2, zulässige Abminderung der Mindeststabzahl  $n$  auch bei der Verwendung von Stabbündeln beibehalten werden darf (1 Bündel  $\hat{=}$  1 Stab).

Balkenabmessungen:  $l/b/d = 5000/300/500$  [mm]

Bündel: Form  $n = 3$  (nach Abschn. 1.2)

Einzelstab:  $\varnothing 14$  mm

## Entwurf

a) Nach DIN 1045 folgt:

$$1. c_{sb} \geq d_{sv} = \sqrt{2} \cdot 14 \text{ mm} = 20 \text{ mm}$$

$$2. c_{sb} \geq 20 \text{ mm}$$

(bezogen auf die Staboberfläche)

b) Daraus ergibt sich

$$u_s \geq 20 \text{ mm} + 14 \text{ mm} \text{ (Schwerpunktabstand)}$$

$$\geq 34 \text{ mm}$$

(bezogen auf den Bündelschwerpunkt)

c) Nach DIN 4102, Tab. 5/1.4

folgt für  $b \geq 300 \text{ mm}$  und F 60:

$$u = u_s \geq 25 \text{ mm}, n = 4$$

d) nach Fußnote 2 gilt:

$$u_s \geq 25 + 10 = 35 \text{ mm}, n = 3 \text{ (siehe b)}$$

gewählt:  $n = 3$  (DIN 4102

$$u = 30 \text{ mm}$$

$$u_s = 37 \text{ mm}$$

Die Betondeckung wird im vorliegenden Fall durch die Bestimmungen der DIN 1045 so festgelegt, daß sich ein

$$u_s = 15 \text{ mm} + 8 \text{ mm} + 14 \text{ mm} = 37 \text{ mm}$$

$$u = 15 \text{ mm} + 8 \text{ mm} + 14/2 \text{ mm} = 30 \text{ mm}$$

ergibt (größer als  $25 + 10 = 35 \text{ mm}$  - DIN 4102 !)

Für diesen Fall der Bewehrungsführung schränkt das Mindeststabzahlkriterium der DIN 4102 eine Bemessung nach der DIN 1045 nicht ein!

### 2.1.2.2 Balken SB-2 (s. Anl. 2.1-2)

Hier wird das Mindeststabzahlkriterium der DIN 4102 bewußt verletzt. Dadurch ist die Bewehrungskonzentration in den besonders gefährdeten Eckbereichen des Querschnitts größer, als es die Vorschrift erlaubt. Mit diesem Versuch sollte



geprüft werden, ob bei einer weit über den Normwerten liegenden Stahlkonzentration in dem Balkenquerschnittsecken eine Feuerwiderstandsdauer durch Verwendung von Bündelbewehrung erreicht werden kann, die bei Anwendung einer Einzelstabbewehrung unter Berücksichtigung des Mindeststabzahlkriteriums zu erwarten ist.

Balkenabmessungen:  $\ell/b/d = 5000/400/500$  [mm]

Bündel: Form  $n = 4$  (nach Abschnitt 1.2)

Einzelstab:  $\varnothing 14$  mm

### Entwurf

a) Nach DIN 1045 folgt:

$$1. c_{sb} \geq d_{sv} = \sqrt{3} \cdot 14 \text{ mm} = 24,2 \text{ mm}$$

$$2. c_{sb} \geq 20 \text{ mm} = \text{gew } C_{sB}$$

(bezogen auf die Staboberfläche)

b) Daraus ergibt sich

$$u_s \geq 24,2 \text{ mm} + 14 \text{ mm} \text{ (Schwerpunktstand)}$$

$$\geq 38,2 \text{ mm}$$

(bezogen auf den Bündelschwerpunkt)

$$\text{gew } u = 31 \text{ mm} = C_{sB} + h_s = 20 + 11 = 31 \text{ mm}$$

( $h_s$  = Lage des Bündelschwerpunkts)

c) Nach DIN 4102, Tab. 5/1.4

folgt für  $b = 400$  mm und F 90

$$u = u_s \geq 35 \text{ mm}, n = 5$$

gewählt: $n = 3 \ll n_{\text{erf}}$ (DIN 4102)
$u = 31 < 35 \text{ mm}$
$u_s = 38 \text{ mm}$

*nichtig war ist*

$$u_c - \varnothing$$

$$C_{sB} = 58 - 14 = 24$$

Auch bei diesem Querschnitt wird die erforderliche Betondeckung von der DIN 1045 bestimmt, wenn man die Auflagen für eine Abminderung der Mindeststabzahl außer acht läßt. Die geforderte Mindestbetondeckung von 15 mm wird hier leicht unterschritten ( $c = 31 - 11 - 8 = 12$  mm).

### 2.1.2.3 Stütze SB-3 (s. Anl. 2.1-3)

An diesem Bauteil wird - wegen der Lastexzentrizität von  $e/d = 1/3$  - das Tragverhalten von Stabbündeln sowohl in der Druckzone als auch in der Zugzone beobachtet. Die Stütze wird einer vierseitigen Brandbeanspruchung unterworfen.

Statisches System:

x-Achse beidseitig gelenkig gelagert

y-Achse beidseitig eingespannt

Stützenabmessungen:  $h = s_k/b/d = 3680/300/300$  [mm]

Bündel: Form  $n = 4$  (nach Abschnitt 1.2)

Einzelstab:  $\varnothing 14$  [mm]

### Entwurf

a) Nach DIN 1045 folgt:

$$1. c_{sb} \geq d_{sv} = \sqrt{3} \cdot 14 \text{ mm} = 24,2 \text{ mm}$$

$$2. c_{sb} \geq 20 \text{ mm}$$

(bezogen auf die Staboberfläche)

Daraus ergibt sich

$$\begin{aligned} u &\geq 20 \text{ mm} + 24,2 \text{ mm} \text{ (Schwerpunktsabstand)} \\ &\geq 38,2 \text{ mm} \\ &\text{(bezogen auf den Bündelschwerpunkt)} \end{aligned}$$

c) nach DIN 4102, Tab. 33 folgt für F 60-A

$$d_{\min} = 240 \text{ mm}, u \geq 25 \text{ mm}$$

Anmerkung: Die Betondeckung wird von der DIN 1045 bestimmt.

gewählt:  $u = 37 \text{ mm}$  (DIN 4102)  
 $u_s = 37 \text{ mm}$

### 2.1.3 Probekörper

Die Bewehrung der Probekörper ist dargestellt für

den Balken 1	in	Anlage	2.1-1,
den Balken 2	in	Anlage	2.1-2,
die Stütze	in	Anlage	2.1-3.

Die Anordnung der Thermoelemente ist

für den Balken 1 der Anlage 2.1-4,  
für den Balken 2 der Anlage 2.1-5,  
für die Stütze der Anlage 2.1-6

zu entnehmen.

### 2.2 Ermittlung der zulässigen Belastung

Mit einem Rechenprogramm [2], das am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz entwickelt und an der institutseigenen Rechenanlage PRIME 400 installiert ist, wurden die Traglasten der 3 Probekörper ermittelt.

Dabei wurden die aktuellen Materialkenngrößen des Betons verwendet. Die Traglast der Stütze wurde unter Berücksichtigung der Theorie II. Ordnung bestimmt. Die Gebrauchslast ergibt sich als der  $1/v$ -fache Teil der Traglast ( $v$  in Abhängigkeit von den Stahldehnungen im Traglastzustand).

*Sehe mehr für  
Stabilität!*

Für das Programm wurden die üblichen Rechenannahmen für Stahlbetonbauteile zugrunde gelegt. Die statischen Systeme entsprachen einem beidseitig gelenkig gelagerten Einfeldbalken bzw. einer beidseitig gelenkig gelagerten Stütze mit gleichgroßen und gleichsinnigen Endexzentrizitäten.

Die 3 Prüfkörper wurden mit den gleichen Baustoffen hergestellt.

a) Stahl:      BSt III K Ø 14

b) Beton:      Transportbeton,  
Firma Union-Beton, Best.-Nr. 4222 ohne Flugasche  
B 25, K 2  
260 kg PZ 350 F/m<sup>3</sup>  
180 kg Wasser/m<sup>3</sup>  
W/Z-Wert = 0,70  
Sieblinienbereich A/B, Größtkorn 16 mm  
Zuschlag: 1835 kg/m<sup>3</sup>  
gemessenes Ausbreitmaß a = 37,5 cm

Festbetoneigenschaften:

$$f_{w,28} = 52 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

$$E = 26,3 \cdot 10^3 \text{ [N/mm}^2\text{]}$$

Feuchtigkeitsgehalt in Gew.-%  
vor dem Trockenheizen nach  
28 Tagen Hallenlagerung:

$$w_1 = 3,61/5,24 \text{ Rand/innen}$$

$$w_2 = 3,53/5,32 \text{ Rand/innen}$$

$$w_3 = 4,08/4,84 \text{ Rand/innen}$$

Vor den Bauteilversuchen wurden die Prüfkörper ca. 4 Std. bei  $> 100^\circ\text{C}$   
trockengeheizt. Anschließend kühlten sie wieder bis auf Raumtemperatur ab.

Das Ergebnis der Traglastberechnung und die Versuchslasten sind in nachfolgender Tabelle 2.3 zusammengestellt.

Tabelle 2.3

Das Ergebnis der Traglastberechnung und die Versuchslasten sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Versuchskörper	Traglast-Schnittgrößen	Beton-Randdehnung [%]	Stahldehnung im Bündelschwerpunkt [%]	Sicherheitsfaktor n. DIN 1045 [v]	Gebrauchs-schnittgrößen Versuchslasten
B 1	$M_u = 169 \text{ kNm}$ (N $\equiv$ 0)	$\epsilon_D = - 1,17$ $\epsilon_Z = + 5,22$	$\epsilon_{St} = 4,84$	1,75	$M_G = 96,6 \text{ kNm}$
B 2	$M_u = 252 \text{ kNm}$ (N $\equiv$ 0)	$\epsilon_D = - 1,29$ $\epsilon_Z = + 5,46$	$\epsilon_{St} = 4,99$	1,75	$M_G = 144 \text{ kNm}$
St	$P_u = - 1635 \text{ kN}$ ( $e_o = 100 \text{ mm}$ )	$\epsilon_D = - 3,49$ $\epsilon_Z = + 1,87$	$\epsilon_{St,D} = - 2,89$ $\epsilon_{St,Z} = + 1,26$	1,87	$P = 874 \text{ kN}$ $M_G = 87,4 \text{ kNm}$ ( $e = 100 \text{ mm}$ )

B = Balken  
St = Stütze

*korrektur für Stabilität*  
*auswerten anst:  $\gamma = 2,1 - \frac{0,25}{3} \cdot 1,26 = 1,95!$*

## 2.3 Versuche

### 2.3.1 allgemeine Beschreibung

Nach der Betonage lagerten die beiden Balken 105 bzw. 111 Tage und die Stütze 119 Tage in einem Hallengebäude des Instituts bis zur Prüfung.

Um die Gefahr von Betonabplatzungen (Wassergehalt ca. 4 Gew.-%) auszuschließen, wurden die 3 Bauteile vor dem Versuch vorgetrocknet (ca. 3 bis 4 Stunden bei einer Brandraumtemperatur von  $> 100^{\circ}\text{C}$ ) und anschließend wieder auf Raumtemperatur abgekühlt.

Die Belastung wurde bei Normaltemperatur stufenweise aufgebracht, danach erfolgte die Beflammung gemäß der ETK nach DIN 4102 Teil 2 bis zum Versagen der Bauteile [1].

Während des Versuchs wurden die Temperaturen in 2-Minuten-Abständen gemessen und automatisch auf Lochstreifen ausgegeben. Die Beobachtung der Durchbiegungen erfolgte bei den beiden Balken durch Ablesen einer Meßuhr und bei der Stütze mit Hilfe eines Kathetometers, die Längenveränderung der Stütze wurde mittels eines Wegaufnehmers kontinuierlich erfaßt.

Die Balken wurden dreiseitig in einem Deckenbrandhaus wie die Erwärmungsversuche, die Stütze in einem Stützenbrandhaus vierseitig beflammt. Die Flammenachsen verliefen bei allen Versuchen parallel zu den Bauteillängsachsen. Thermisch bedingte Deformationen während der Brandversuche wurden nicht behindert.

Die Balkenversuche wurden mit einem Rechenprogramm [3] analysiert, das an die thermische Berechnung [1] eine mechanische Tragwerksanalyse anschließt.

Dort werden folgende Größen - nach den neuesten Erkenntnissen des Sonderforschungsbereichs 148 "Brandverhalten von Bauteilen" - temperaturabhängig berücksichtigt [3], [6]:

- thermische Dehnung von Beton und Betonstahl,
- Temperaturleitzahl von Beton und Betonstahl,
- $\sigma$ - $\epsilon$ -Beziehungen von Beton und Betonstahl (Festigkeit, Verformungsfähigkeit).

Für die beiden Balkenversuche errechnete das Programm folgende Versagenswerte:

Balken 1:  $t_u = 76$  Minuten bei  $T_m = 570^\circ\text{C}$ ,  
Balken 2:  $t_u = 99$  Minuten bei  $T_m = 560^\circ\text{C}$ .

Vergleichend wurde rechnerisch eine konstruktiv aufwendigere Balkenabdeckung untersucht, die lediglich die Balkenoberseite isoliert und die Balkenränder vollständig beflammt, also auch die seitlichen Bereiche der Druckzone, thermisch beansprucht. Die DIN 4102 verlangt für dreiseitig beflamnte Balken eine solche Abdeckung. Es ergeben sich dann rechnerisch Versagenszeiten

für den Balken 1 von 73 Minuten und  
für den Balken 2 von 95 Minuten.

Bei diesen Berechnungen wurde von den Materialeigenschaften ausgegangen, die auch bei der Bestimmung der Gebrauchs- und Traglasten Verwendung fanden (Abschn. 2.2).

Anm.:

Bei Stahlbetonbalken mit voll ausgelasteter Bewehrung wie auch bei reinen Stahlquerschnitten aus St 37 und St 52 tritt das Bauteilversagen in der Regel erst oberhalb einer Stahltemperatur von  $500^\circ\text{C}$  auf.  
In DIN 4102 ist für diese Fälle als crit  $T\ 500^\circ\text{C}$  festgelegt.

2.3.2 Versuchsergebnisse

In den Anlagen 2.3.2 sind

- die Temperaturentwicklungen der Bündel (die Bewehrungskörbe sind teilweise nicht exakt zentrisch eingebaut worden, so daß Temperaturunterschiede zwischen den Eckbündeln eines Bauteils vorkommen),
- die Verformungen der Bauteile und
- die Verformungsgeschwindigkeit der Balken (DIN 4102, Teil 2: Versagen definiert bei  $\frac{\Delta f}{\Delta t} = \frac{l^2}{9000 \cdot h}$ )

dargestellt.

§14

00  
12

00  
3

00  
25

Mittel (1, 3, 5)

576

<

575

<

610

<

3 Einstäbe

Mittel (1, 2, 4, 5)

586

590

624

Eckbinde

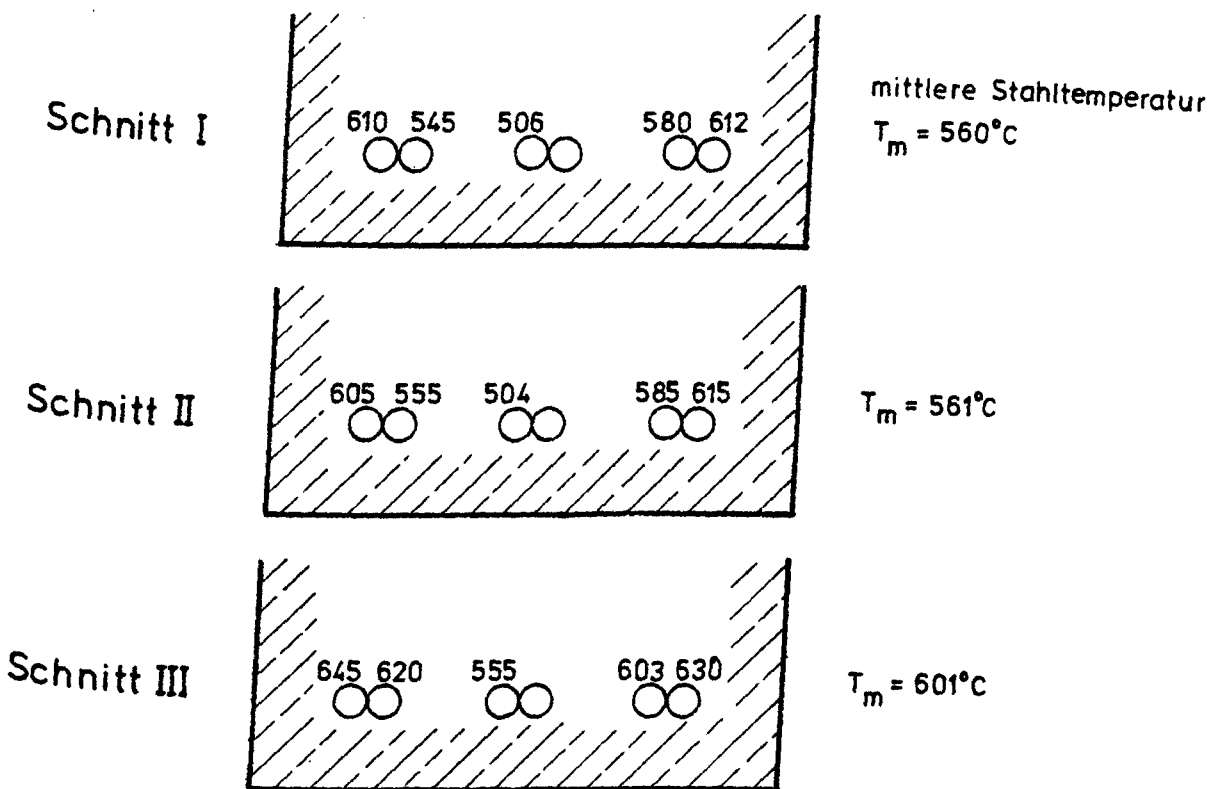


### 2.3.3 Auswertung

#### 2.3.3.1 Balken 1

Dieser Versuch zeigt bei Beachtung des Mindeststabzahlkriteriums eine deutliche Überschreitung der konstruktiv zugrunde gelegten Feuerwiderstandsklasse F 60 von  $\Delta t_u = 23$  Minuten.

Stahltemperaturen zum Versagenszeitpunkt bei Balken 1:



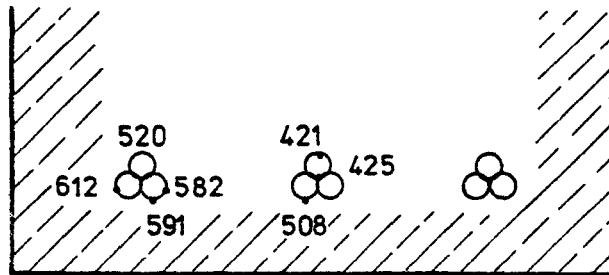
Bei erlaubter Reduzierung der Mindeststabzahl  $n$  gemäß DIN 4102 Teil 4 (pro zusätzlicher 10 mm seitlicher Betondeckung ist Verringerung von  $n$  um 1 möglich) ergab sich eine Feuerwiderstandsdauer von 83 min, allerdings bei gleichzeitiger (von der DIN 1045 vorgeschriebener) Überschreitung von  $u$  um 5 mm. Das sind 23 min mehr als die geforderten 60 min.

#### 2.3.3.2 Balken 2

Obwohl die von der DIN 4102 Teil 4 geforderte Mindeststabzahl  $n = 5$  wesentlich unterschritten ist (vorh.  $n = 3 \ll \text{erf } n = 5$ ), erreicht dieser Balken bei einer Versagenstemperatur des Stahls von ca.  $540^\circ\text{C}$  noch eine Feuerwiderstandsdauer von 91,5 Minuten.

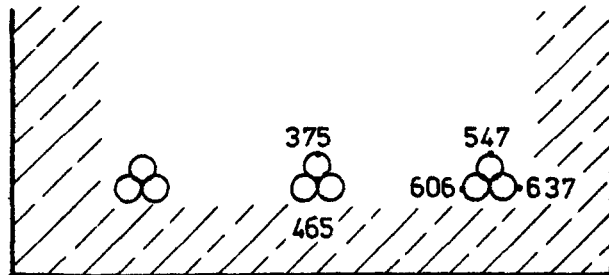
Stahltemperaturen zum Versagenszeitpunkt bei Balken 2:

Schnitt I



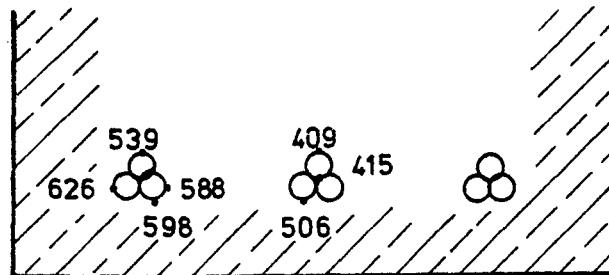
mittlere Stahltemperatur  
 $T_m = 542^\circ\text{C}$

Schnitt II



$T_m = 542^\circ\text{C}$

Schnitt III



$T_m = 538^\circ\text{C}$

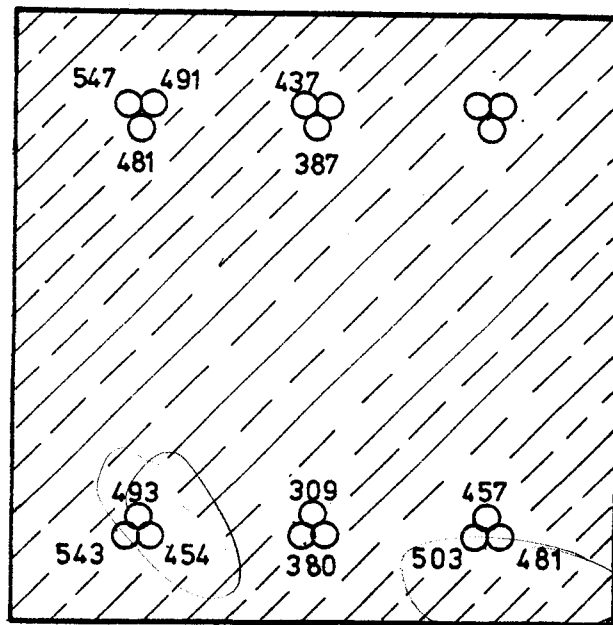
#### 2.3.3.3 Stütze

Die Stütze ist für eine Feuerwiderstandsdauer F 60 gemäß den Vorschriften in DIN 4102 bemessen und versagte nach 67 Minuten Versuchsdauer.

*aber:  $b = 300 > 240$   
 $u = 27 > 25$   
 möglich über bemessen!*

Stahltemperaturen der Stütze zum Versagenszeitpunkt:

Schnitt II



*widerprüfbar*

#### 2.3.4 Zusammenfassung

Die insgesamt 3 Versuchskörper, ein Balkenversuch F 60, ein Balkenversuch F 90, ein Stützenversuch F 60, wurden entsprechend DIN 4102 Teil 2 geprüft [4].

Die beiden Balkenversuche sollten die Frage beantworten helfen, ob die geltende Regelung der Achsabstände und der Mindeststabzahl auch auf Stabbündelbewehrung angewendet werden kann bzw. muß oder ob wegen der teilweise großen Temperaturunterschiede innerhalb der Bündel eine Lockerung dieser Bestimmungen zugelassen werden kann.

Beim Balken SB-1 wurde eine Bewehrungsanordnung gemäß DIN 4102, Abschn. 3.2, Tabelle 5 angestrebt (in Verbindung mit DIN 1045), während beim Balken SB-2 (unter Mißachtung der geltenden DIN 4102) das Temperaturgefälle innerhalb der Stabbündel voll genutzt wurde. Beim Balken SB-1 wurden die Stabbündel in der brandschutztechnischen Bemessung wie Einzelstäbe behandelt. Für die hier vorliegenden Verhältnisse ergibt sich nach Norm eine Mindeststabzahl von  $n = 4$ , die im vorliegenden Fall mit  $n = 3$  durch ein um 10 mm vergrößertes seitliches Achsmaß kompensiert werden muß. Die Achsmaße  $u_s$  und  $u$  wurden auf den Bündelschwerpunkt bezogen, wobei die DIN 4102 ein um 5 mm geringeres  $u$  zugelassen hätte.

Unter seiner planmäßigen Last versagte der Balken 1 nach 83 Minuten ETK-Beanspruchung bei einer mittleren Stahltemperatur zum Versagenszeitpunkt von 560 °C. Für die Auswertung wurde der experimentelle Versagenszeitpunkt reduziert auf einen rechnerischen Versagenszeitpunkt für eine Versagenstemperatur von 500 °C. Unter Berücksichtigung der mittleren Aufheizgeschwindigkeit der Stabbündel im Versagensbereich von  $\dot{T} \leq 5$  K/min ergibt sich der rechnerische, auf die kritische Stahltemperatur nach DIN 4102 normierte Versagenswert zu  $t_u = 71$  min. Dieser Wert liegt mit 11 Minuten über der geforderten Feuerwiderstandsklasse.

Durch Vergleichsrechnungen - sowohl thermische als auch mechanische Querschnittsanalysen wurden hierfür benutzt - konnte geklärt werden, daß die Anwendung des bisherigen Normkriteriums für die Stabbündel stets eine deutlich erhöhte Versagenszeit gegenüber den projektierten F-Klassen erwarten läßt, da die Forderungen der DIN 1045 bezüglich der Betondeckung Stabbündel im allgemeinen (bei kleiner Feuerwiderstandsklasse) weiter in das Querschnittsinnere rücken, als dies allein aus den bisherigen brandschutztechnischen Vorschriften erforderlich ist.

Von diesen "Lagerreserven" aus DIN 1045 Abschnitt 18 kann für eine verbesserte Fassung der DIN 4102, Teil 4 Gebrauch gemacht werden, so daß auch eine allein aus Eckbündeln bestehende Bewehrung nach den Bestimmungen der DIN 4102 den brandschutztechnischen Anforderungen genügt.

Im zweiten Balkenversuch (Balken SB-2) wurde daher eine modifizierte brandschutztechnische Bemessung gewählt.

Bei einer Bewehrung mit  $n = 3$  Stabbündeln wird gegenüber DIN 4102, Teil 4, Tabelle 5, Zeile 1.4.2 die Mindeststabzahl um 2 unterschritten. Außerdem wurde bei der brandschutztechnischen Bemessung auf ein vergrößertes seitliches Achsmaß verzichtet. Beim Balken 2 wurde daher mit  $u_s = 35$  mm bewußt eine gegenüber DIN 4102 verminderte seitliche Überdeckung angestrebt. Auch bei diesem Versuch wurde das gewählte Achsmaß auf den Bündelschwerpunkt bezogen. Um den Forderungen der DIN 1045 zu genügen, wurde der Versuchskörper jedoch mit einem seitlichen Achsmaß des Bündelschwerpunktes von  $u_s = 38$  mm betonierte. Der Achsabstand  $u$  beträgt im Bauteil 31 mm gemäß DIN 1045 und liegt unter dem Wert  $u \geq 35$  mm nach DIN 4102.

*↑  
minimale nach DIN 1045 jedoch  
31 mm + 7 mm = 38 mm sein!*

Der Versagenszeitpunkt für diesen Versuch wurde experimentell zu  $t_u = 91,5$  min entsprechend DIN 4102 Teil 2 bestimmt. Die mittlere Bündeltemperatur zum Versagenszeitpunkt betrug ca.  $540\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Bei einer Normierung auf die kritische Stahltemperatur nach DIN 4102, vgl. hierzu Versuchsbeschreibung Balken 1, ergibt sich ein rechnerischer normierter Versagenszeitpunkt von ca. 83 min. Dieser Wert liegt damit unter dem projizierten Zielwert der Klasse F 90.

Die vergleichende rechnerische Analyse der Versuche 1 und 2 bestätigte, daß die veränderten Erwärmungsverhältnisse bei Anordnung von Stabbündeln näherungsweise erfaßt werden können durch eine Vorabverminderung der Mindeststabzahl um 1 und die Wahl der Achsabstände in bezug auf den jeweils äußersten Stab der Eckbündel. Nach diesem Konzept wurde der dritte Versuch (F 60-Stütze) konzipiert. Entsprechend DIN 4102 Teil 4, Abschnitt 3.14, Tabelle 33, ergibt sich ein Achsmaß von 25 mm. Bei der für diesen Versuch gewählten Anordnung von Dreierbündeln aus Stäben  $\varnothing 14$  resultiert ein Achsmaß, bezogen auf den Bündelschwerpunkt, von  $u = 25 + 14/2 = 32$  mm. Im Versuch selbst wurde die Mindestüberdeckung nach DIN 1045 eingehalten, woraus ein Wert für das Achsmaß des Gesamtbündels von 38 mm resultiert.

Die Stütze versagte nach 67 min ETK-Beanspruchung. Die mittlere Bündeltemperatur zum Versagenszeitpunkt von  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  kann bei druckbeanspruchten Bauteilen bekanntlich nicht als Beurteilungskriterium herangezogen werden, da hier das Versagen der Druckzone traglastbestimmend sein kann. Zur Verallgemeinerung des erzielten Ergebnisses wurde hingegen durch eine rechnerische Traglastanalyse überprüft, wie weit der Versagenszeitpunkt absinkt, wenn die Stütze mit einer größeren Stablänge ausgeführt wird. Im vorliegenden Fall ergab sich für den Versuch 3 eine Stützenschlankheit von  $s_k/d = 12,5$  mit einer rechnerischen Versagenszeit von ca. 70 Minuten. Um den für Hochbaustützen maßgebenden Schlankheitsbereich abzudecken, wurde eine rechnerische Traglastanalyse für eine Stütze mit gleicher Querschnittsabmessung jedoch der Schlankheit  $s_k/d = 20$  durchgeführt. Es ergab sich hierfür eine Versagenszeit von 60 min. Die Anwendbarkeit für F-Klassen  $> F 60$  wurde rechnerisch überprüft.

### 3. Gesamtergebnis

#### 3.1 Ergebnis der Untersuchungen

Die Erwärmungsversuche und die rechnerischen thermischen Analysen von Betonquerschnitten führen zusammen zu dem folgenden Ergebnis:

Eckbündel erwärmen sich schneller als Einzelstäbe in den Querschnittsecken, wenn man bei Bündeln sowohl  $u$  als auch  $u_s$  auf den Bündelschwerpunkt bezieht (s. Bild 1.5-d)! Bei ausschließlicher Beachtung der DIN 4102 kommen wegen des stark gekrümmten Temperaturgradienten große Bewehrungsanteile in sehr warme Querschnittsteile, so daß die inneren, relativ kalten Stäbe die mittlere Bündeltemperatur nicht auf das geforderte Maß drücken können.

Bei Erreichen der Feuerwiderstandsdauer soll die mittlere Temperatur aller Bewehrungsstäbe die kritische Temperatur nach DIN 4102 nicht überschreiten. Sowohl Achsabstände  $u$  und  $u_s$  als auch das Mindeststabzahlkriterium sind für Einzelstäbe nach diesem Kriterium festgelegt worden. Die Anwendung geltender Bestimmungen der DIN 4102 auf Stabbündel ergibt mittlere Stahltemperaturen, die deutlich über  $\text{crit } T$  liegen können, bei Stabzahl  $n = 2$ , war dies ausnahmslos der Fall. Bei vielen der für die Baupraxis bedeutsamen Anwendungsmöglichkeiten müssen die von der DIN 4102 geforderten Achsmaße  $u$  und  $u_s$  jedoch ohnehin überschritten werden, um die von der DIN 1045 vorgeschriebenen Werte  $C_{sB}$  für die Betondeckung zu erfüllen.

Soll auch für Stabbündelbewehrung das geltende Sicherheitskonzept beibehalten werden, so muß auch durch die DIN 4102 sichergestellt sein, daß die mittlere Temperatur der Bewehrung durch Verwendung von Stabbündeln nicht erhöht wird. Dies wird (wie geschildert ohne bedeutende Änderung der geltenden Regeln zur Bewehrungsführung) erreicht, indem die Achsabstände  $u$  und  $u_s$  auf den Schwerpunkt des äußersten Einzelstabes eines Bündels bezogen werden (siehe Bild 1.5-d, Kurve 3).

Durch diese Regelung liegt die mittlere Temperatur von Eckbündeln so weit unter der Temperatur eines Einzelstabes in der Querschnittsecke, daß die nötige Anzahl der Stäbe im kälteren Mittenbereich eines Querschnitts verringert werden kann, um im Mittel aller Stäbe  $\text{crit } T$  nicht zu überschreiten.

Umfangreiche numerische Analysen des thermischen Verhaltens von bündelbewehrten Betonquerschnitten führen zu folgendem Vorschlag:

- 3.1  $u$  und  $u_s$  der DIN 4102 Teil 4 sind bei Bündelbewehrung stets auf den äußersten Einzelstab eines Bündels zu beziehen.
- 3.2 Bei Verwendung von Stabbündeln darf die Mindeststabzahl  $n$  nach DIN 4102 Teil 4 als "Mindest-Bündelzahl" verstanden und vorab um den Wert 1 reduziert werden.

Bei Anwendung dieses Vorschlags für Bündel, die aus 2 Stäben mit kleinen Einzelstabdurchmessern bestehen, kann die mittlere Stahltemperatur geringfügig  $\text{crit } T$  überschreiten. Diese Fälle werden vom allgemeinen Sicherheitskonzept abgedeckt, was auch die beiden Bauteilversuche an Balken unterstreichen.

Die Mindestbündelzahl darf außerdem - wie bisher in [4] - noch um jeweils "1" vermindert werden, wenn  $u_s$  um jeweils 10 mm vergrößert wird.

### 3.2 Abschließende Empfehlungen

Aufgrund der durchgeführten experimentellen und numerischen Untersuchungen zum Erwärmungs- und Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit Stabbündelbewehrung wird empfohlen, die bisherige Regelung in DIN 4102 Teil 4 wie folgt zu ändern:

1. Für Biegebalken mit Stabbündelbewehrung darf die Mindeststabzahl  $n$  entsprechend Abschnitt 3.2 und 3.3 um den Wert 1 vermindert werden.
2. Die angegebenen Werte für die Achsmaße  $u$  und  $u_s$  sind jeweils auf den Schwerpunkt des äußersten Einzelstabes der Eck-Stabbündel zu beziehen.
3. Zu Abschnitt 3.1.3.2 der DIN 4102 Teil 4 (3/1981) [4]  
Sofern Stabbündel verwendet werden, beziehen sich  $u$  und  $u_s$  auf die Achse desjenigen Einzelstabes des Bündels, der planmäßig den geringsten Abstand zur betreffenden beflammtten Oberfläche hat.  $u_o$  bezieht sich auf den Bündelschwerpunkt.

Die Anwendung der oben genannten Bemessungskriterien führt zu einer besseren Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Stabbündelbewehrungen für Stahlbetonbauteile mit Brandschutzanforderungen. Das Sicherheitsniveau der DIN 4102 wird durch die empfohlenen Bemessungswerte nicht vermindert.

Nachfolgend sind der Abschnitt 3.1.3.2 sowie die Tabellen 5 und 7 (alt und neu) der DIN 4102 Teil 4 [4] mit dem Vorschlag der Veränderung für Stabbündelbewehrung beigelegt.

Jetziger Abschnitt 3.1.3.2 aus DIN 4102 Teil 4 (3/1981)

"3.1.3.2 Sofern Stabbündel verwendet werden, beziehen sich alle Werte von  $u$  auf die Achse der Bündel."

Neuvorschlag für Abschnitt 3.1.3.2 aus DIN 4102 Teil 4 (3/1981)

"Sofern Stabbündel verwendet werden, beziehen sich  $u$  und  $u_g$  auf die Achse desjenigen Einzelstabes des Bündels, der planmäßig den geringsten Abstand zur betreffenden beflamnten Oberfläche hat.  $u_o$  bezieht sich auf den Bündelschwerpunkt."



3.2 Statisch bestimmt gelagerte Balken

Tabelle 5. Mindestachsabstände sowie Mindeststabzahl der Zugbewehrung von 1- bis 4seitig beanspruchten, statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken<sup>4)</sup> aus Normalbeton



3.2

Zeile	Konstruktionsmerkmale	Feuerwiderstandsklasse				
		F 30	F 60	F 90	F 120	F 180
1	Mindestachsabstände $u$ <sup>1)</sup> und $u_s$ <sup>1)</sup> sowie Mindeststabzahl $n$ <sup>2)</sup> der Zugbewehrung <b>unbekleideter, einlagig bewehrter Balken</b>					
1.1	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	80	$\leq 120$	$\leq 150$	$\leq 200$	$\leq 240$
1.1.1	$u$ in mm	25	40	55 <sup>3)</sup>	65 <sup>3)</sup>	80 <sup>3)</sup>
1.1.2	$u_s$ in mm	35	50	65	75	90
1.1.3	$n$	1	2	2	2	2
1.2	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	120	160	200	240	300
1.2.1	$u$ in mm	15	35	45	55 <sup>3)</sup>	70 <sup>3)</sup>
1.2.2	$u_s$ in mm	25	45	55	65	80
1.2.3	$n$	2	2	3	3	3
1.3	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	160	200	250	300	400
1.3.1	$u$ in mm	12	30	40	50	65 <sup>3)</sup>
1.3.2	$u_s$ in mm	22	40	50	60	75
1.3.3	$n$	2	3	4	4	4
1.4	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	$\geq 200$	$\geq 300$	$\geq 400$	$\geq 500$	$\geq 600$
1.4.1	$u = u_s$ in mm	12	25	35	45	60 <sup>3)</sup>
1.4.2	$n$	3	4	5	5	5
2	Mindestachsabstände $u$ , $u_m$ und $u_s$ sowie Mindeststabzahl $n$ der Zugbewehrung bei <b>unbekleideten, mehrlagig bewehrten Balken</b>	$u_m \geq u$ nach Zeile 1 $u$ und $u_s \geq u_{F30}$ nach Zeile 1 sowie $u$ und $u_s \geq 0,5 u$ nach Zeile 1 keine Anforderungen				
2.1	$u_m$ nach Gleichung (3)					
2.2	$u$ und $u_s$					
2.3	Mindeststabzahl $n$					
3	Mindestachsabstände $u$ und $u_s$ bzw. $u_m$ von <b>Balken mit Bekleidungen</b> aus	$u$ , $u_m$ und $u_s$ nach den Zeilen 1 und 2, Abminderungen nach Tabelle 2 sind möglich, $u$ jedoch nicht kleiner als für F 30 $u$ und $u_s \geq 12$ Konstruktion nach Abschnitt 6.5				
3.1	Putzen nach den Abschnitten 3.1.5.1 bis 3.1.5.5					
3.2	Unterdecken					

<sup>1)</sup> Zwischen den  $u$ - und  $u_s$ -Werten von Zeile 1 darf in Abhängigkeit von der Balkenbreite  $b$  geradlinig interpoliert werden.

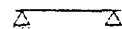
<sup>2)</sup> Die geforderte Mindeststabzahl  $n$  darf unterschritten werden, wenn der seitliche Achsabstand  $u_s$  pro entfallendem Stab jeweils um 10 mm vergrößert wird; Stabbündel gelten in diesem Falle als ein Stab.

<sup>3)</sup> Bei einer Betondeckung  $c > 40$  mm ist eine Schutzbewehrung nach Abschnitt 3.1.4 erforderlich.

<sup>4)</sup> Die Tabellenwerte gelten auch für **Spannbetonbalken**; die Mindestachsabstände  $u$ ,  $u_m$  und  $u_s$  sind jedoch entsprechend den Angaben von Tabelle 1 um die folgenden  $\Delta u$ -Werte zu erhöhen:  
Bei vergüteten Drähten mit crit  $T = 450^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 5$  mm und  
bei kaltgezogenen Drähten und Litzen mit crit  $T = 350^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 15$  mm.  
Sofern die Mindestachsabstände  $u$  oder  $u_s$  mit 12 mm angegeben sind, dürfen die  $\Delta u$ -Werte um 2 mm verringert werden.

3.2 Statisch bestimmt gelagerte Balken

Tabelle 5. Mindestachsabstände sowie Mindeststabzahl der Zugbewehrung von 1- bis 4seitig beanspruchten, statisch bestimmt gelagerten Stahlbetonbalken<sup>4)</sup> aus Normalbeton



3.2

Zeile	Konstruktionsmerkmale	Feuerwiderstandsklasse				
		F 30	F 60	F 90	F 120	F 180
1	Mindestachsabstände $u$ <sup>1)</sup> und $u_s$ <sup>1)</sup> sowie Mindeststabzahl $n$ <sup>2)</sup> der Zugbewehrung <b>unbekleideter, einlagig bewehrter Balken</b>					
1.1	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	80	$\leq 120$	$\leq 150$	$\leq 200$	$\leq 240$
1.1.1	$u$ in mm	25	40	55 <sup>3)</sup>	65 <sup>3)</sup>	80 <sup>3)</sup>
1.1.2	$u_s$ in mm	35	50	65	75	90
1.1.3	$n$	1	2	2	2	2
1.2	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	120	160	200	240	300
1.2.1	$u$ in mm	15	35	45	55 <sup>3)</sup>	70 <sup>3)</sup>
1.2.2	$u_s$ in mm	25	45	55	65	80
1.2.3	$n$	2	2	3	3	3
1.3	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	160	200	250	300	400
1.3.1	$u$ in mm	12	30	40	50	65 <sup>3)</sup>
1.3.2	$u_s$ in mm	22	40	50	60	75
1.3.3	$n$	2	3	4	4	4
1.4	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	$\geq 200$	$\geq 300$	$\geq 400$	$\geq 500$	$\geq 600$
1.4.1	$u = u_s$ in mm	12	25	35	45	60 <sup>3)</sup>
1.4.2	$n$	3	4	5	5	5
2	Mindestachsabstände $u$ , $u_m$ und $u_s$ sowie Mindeststabzahl $n$ der Zugbewehrung bei <b>unbekleideten, mehrlagig bewehrten Balken</b>	$u_m \geq u$ nach Zeile 1 $u$ und $u_s \geq u_{F30}$ nach Zeile 1 sowie $u$ und $u_s \geq 0,5 u$ nach Zeile 1 keine Anforderungen				
2.1	$u_m$ nach Gleichung (3)					
2.2	$u$ und $u_s$					
2.3	Mindeststabzahl $n$					
3	Mindestachsabstände $u$ und $u_s$ bzw. $u_m$ von <b>Balken mit Bekleidungen aus</b>	$u$ , $u_m$ und $u_s$ nach den Zeilen 1 und 2. Abminderungen nach Tabelle 2 sind möglich, $u$ jedoch nicht kleiner als für F 30 $u$ und $u_s \geq 12$ Konstruktion nach Abschnitt 6.5				
3.1	Putzen nach den Abschnitten 3.1.5.1 bis 3.1.5.5					
3.2	Unterdecken					

<sup>1)</sup> Zwischen den  $u$ - und  $u_s$ -Werten von Zeile 1 darf in Abhängigkeit von der Balkenbreite  $b$  geradlinig interpoliert werden.

<sup>2)</sup> Die geforderte Mindeststabzahl  $n$  darf unterschritten werden, wenn der seitliche Achsabstand  $u_s$  pro entfallendem Stab bzw. Stabbündel jeweils um 10 mm vergrößert wird. Stabbündel gelten in diesem Fall als ein Stab. Bei Stabbündeln darf  $n$  als Mindestbündelzahl vorab um 1 vermindert werden - Abschnitt 3.1.3.2 ist zu beachten.

<sup>3)</sup> Bei einer Betondeckung  $c > 40$  mm ist eine Schutzbewehrung nach Abschnitt 3.1.4 erforderlich.

<sup>4)</sup> Die Tabellenwerte gelten auch für **Spannbetonbalken**; die Mindestachsabstände  $u$ ,  $u_m$  und  $u_s$  sind jedoch entsprechend den Angaben von Tabelle 1 um die folgenden  $\Delta u$ -Werte zu erhöhen:

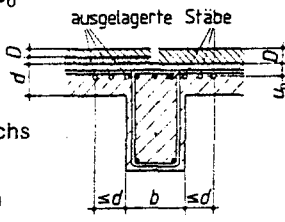
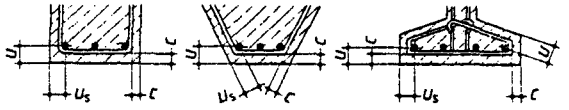
Bei vergüteten Drähten mit crit  $T = 450^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 5$  mm und

bei kaltgezogenen Drähten und Litzen mit crit  $T = 350^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 15$  mm.

Sofern die Mindestachsabstände  $u$  oder  $u_s$  mit 12 mm angegeben sind, dürfen die  $\Delta u$ -Werte um 2 mm verringert werden.

Jetzige Tabelle 7 aus DIN 4102 Teil 4 (3/1981)

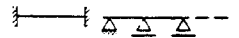
Tabelle 7. Mindestachsabstand und Lage der Stütz- bzw. Einspannbewehrung sowie Mindestachsabstände nebst Mindeststabzahl der Feldbewehrung von maximal 3seitig beanspruchten statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken<sup>4)</sup> aus Normalbeton

Zeile	Konstruktionsmerkmale Weitere Angaben siehe Bild 1 in Abschnitt 3.1.3	Feuerwiderstandsklasse				
		F 30	F 60	F 90	F 120	F 180
1	Mindestachsabstand $u_0$ in mm der Stütz- bzw. Einspannbewehrung ohne Anordnung von Estrichen					
1.1	bei Anordnung eines nichtbrennbaren Estrichs oder eines Asphalt-estrichs					
1.2	Mindestdicke $D$ in mm des Estrichs bei Wahl von $u_0$ nach Zeile 1.2					
2		12	12	15	30	50
3	Mindestachsabstände $u_1$ und $u_s$ <sup>1)</sup> sowie Mindeststabzahl $n$ <sup>2)</sup> der Feldbewehrung <b>unbekleideter, einlagig bewehrter Balken</b> bei Anordnung der Stütz- bzw. Einspannbewehrung	 <p><math>u</math>, <math>u_s</math> und <math>n</math> sind nach Abschnitt 3.2.4 (Tabelle 5, Zeile 1) zu bestimmen.</p>				
3.1	nach DIN 1045					
3.2	nach Abschnitt 3.3.4.3, sofern das Stützweitenverhältnis $\min l \geq 0,8 \max l$ ist					
3.2.1	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	80	$\leq 120$	$\leq 150$	$\leq 200$	$\leq 240$
3.2.1.1	$u$ in mm	12	25	35	45	60 <sup>3)</sup>
3.2.1.2	$u_s$ in mm	12	35	45	55	70
3.2.1.3	$n$	1	2	2	2	2
3.2.2	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	$\geq 160$	$\geq 200$	$\geq 250$	$\geq 300$	$\geq 400$
3.2.2.1	$u$ in mm	12	12	25	35	50 <sup>3)</sup>
3.2.2.2	$u_s$ in mm	12	20	35	45	60
3.2.2.3	$n$	2	3	4	4	4
4	Mindestachsabstände $u$ , $u_m$ und $u_s$ sowie Mindeststabzahl $n$ der Feldbewehrung <b>unbekleideter, mehrlagig bewehrter Balken</b> bei einer Anordnung der Stütz- bzw. Einspannbewehrung nach DIN 1045	$u$ , $u_m$ und $u_s$ sind nach Abschnitt 3.2.4 (Tabelle 5, Zeile 2) zu bestimmen.				
4.1						
4.2	nach Abschnitt 3.3.4.3, sofern das Stützweitenverhältnis $\min l \geq 0,8 \max l$					
4.2.1	$u_m$ nach Gleichung (3) in Abschnitt 3.2.4	$u_m \geq u$ nach Zeile 3				
4.2.2	$u$ und $u_s$	$u$ und $u_s \geq u_{F30}$ nach Zeile 3 sowie $u$ und $u_s \geq 0,5 u$ nach Zeile 3				
4.2.3	$n$	keine Anforderungen				
5	Mindestachsabstände $u$ und $u_s$ bzw. $u_m$ von <b>Balken mit Bekleidungen</b> aus Putzen nach den Abschnitten 3.1.5.1 bis 3.1.5.5	$u$ , $u_m$ und $u_s$ nach den Zeilen 3 und 4, Abminderungen nach Tabelle 2 sind möglich, $u$ jedoch $\geq 12$ mm				
5.1		$u$ und $u_s \geq 12$ mm				
5.2	Unterdecken	Konstruktion nach Abschnitt 6.5				

- 1) Zwischen den  $u$ - und  $u_s$ -Werten von Zeile 3 darf in Abhängigkeit von der Balkenbreite  $b$  geradlinig interpoliert werden.
- 2) Die geforderte Mindeststabzahl  $n$  darf unterschritten werden, wenn der seitliche Achsabstand  $u_s$  pro entfallendem Stab jeweils um 10 mm vergrößert wird; Stabbündel gelten in diesem Fall als ein Stab.
- 3) Bei einer Betondeckung  $c > 40$  mm ist eine Schutzbewehrung nach Abschnitt 3.1.4 erforderlich.
- 4) Die Tabellenwerte gelten auch für **Spannbetonbalken**; die Mindestachsabstände  $u$ ,  $u_m$ ,  $u_s$  und  $u_0$  sind jedoch entsprechend den Angaben von Tabelle 1 um die folgenden  $\Delta u$ -Werte zu erhöhen:  
 Bei vergüteten Drähten mit crit  $T = 450^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 5$  mm und  
 bei kaltgezogenen Drähten und Litzen mit crit  $T = 350^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 15$  mm.  
 Sofern  $u$ ,  $u_0$  oder  $u_s$  mit 12 mm angegeben sind, dürfen die  $\Delta u$ -Werte um 2 mm verringert werden.

Neuvorschlag für Tabelle 7 aus DIN 4102 Teil 4 (3/1981), s. Fußnote 2)

Tabelle 7. Mindestachsabstand und Lage der Stütz- bzw. Einspannbewehrung sowie Mindestachsabstände nebst Mindeststabzahl der Feldbewehrung von maximal 3seitig beanspruchten statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonbalken<sup>4)</sup> aus Normalbeton



Zeile	Konstruktionsmerkmale Weitere Angaben siehe Bild 1 in Abschnitt 3.1.3	Feuerwiderstandsklasse				
		F 30	F 60	F 90	F 120	F 180
1	Mindestachsabstand $u_0$ in mm der Stütz- bzw. Einspannbewehrung ohne Anordnung von Estrichen					
1.1	bei Anordnung eines nichtbrennbaren Estrichs oder eines Asphalt-estrichs					
2	Mindestdicke $D$ in mm des Estrichs bei Wahl von $u_0$ nach Zeile 1.2	12	12	15	30	50
3	Mindestachsabstände $u_1$ und $u_s$ sowie Mindeststabzahl $n$ der Feldbewehrung <b>unbekleideter, einlagig bewehrter Balken</b> bei Anordnung der Stütz- bzw. Einspannbewehrung					
3.1	nach DIN 1045	$u, u_s$ und $n$ sind nach Abschnitt 3.2.4 (Tabelle 5, Zeile 1) zu bestimmen.				
3.2	nach Abschnitt 3.3.4.3, sofern das Stützweitenverhältnis $\min l \geq 0,8 \max l$ ist	80	$\leq 120$	$\leq 150$	$\leq 200$	$\leq 240$
3.2.1	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	12	25	35	45	60 <sup>3)</sup>
3.2.1.1	$u$ in mm	12	35	45	55	70
3.2.1.2	$u_s$ in mm	1	2	2	2	2
3.2.1.3	$n$	$\geq 160$	$\geq 200$	$\geq 250$	$\geq 300$	$\geq 400$
3.2.2	bei einer Balkenbreite $b$ in mm von	12	12	25	35	50 <sup>3)</sup>
3.2.2.1	$u$ in mm	12	20	35	45	60
3.2.2.2	$u_s$ in mm	2	3	4	4	4
3.2.2.3	$n$					
4	Mindestachsabstände $u, u_m$ und $u_s$ sowie Mindeststabzahl $n$ der Feldbewehrung <b>unbekleideter, mehrlagig bewehrter Balken</b> bei einer Anordnung der Stütz- bzw. Einspannbewehrung					
4.1	nach DIN 1045	$u, u_m$ und $u_s$ sind nach Abschnitt 3.2.4 (Tabelle 5, Zeile 2) zu bestimmen.				
4.2	nach Abschnitt 3.3.4.3, sofern das Stützweitenverhältnis $\min l \geq 0,8 \max l$					
4.2.1	$u_m$ nach Gleichung (3) in Abschnitt 3.2.4	$u_m \geq u$ nach Zeile 3				
4.2.2	$u$ und $u_s$	$u$ und $u_s \geq u_{F30}$ nach Zeile 3 sowie $u$ und $u_s \geq 0,5 u$ nach Zeile 3				
4.2.3	$n$	keine Anforderungen				
5	Mindestachsabstände $u$ und $u_s$ bzw. $u_m$ von					
5.1	<b>Balken mit Bekleidungen</b> aus Putzen nach den Abschnitten 3.1.5.1 bis 3.1.5.5	$u, u_m$ und $u_s$ nach den Zeilen 3 und 4, Abminderungen nach Tabelle 2 sind möglich, $u$ jedoch $\geq 12$ mm				
5.2	Unterdecken	$u$ und $u_s \geq 12$ mm Konstruktion nach Abschnitt 6.5				

<sup>1)</sup> Zwischen den  $u$ - und  $u_s$ -Werten von Zeile 3 darf in Abhängigkeit von der Balkenbreite  $b$  geradlinig interpoliert werden.

<sup>2)</sup> Die geforderte Mindeststabzahl  $n$  darf unterschritten werden, wenn der seitliche Achsabstand  $u_s$  pro entfallendem Stab bzw. Stabbündel jeweils um 10 mm vergrößert wird. Stabbündel gelten in diesem Fall als ein Stab. Bei Stabbündeln darf  $n$  als Mindestbündelzahl vorab um 1 vermindert werden – Abschnitt 3.1.3.2 ist zu beachten.

<sup>3)</sup> Bei einer Betondeckung  $c > 40$  mm ist eine Schutzbewehrung nach Abschnitt 3.1.4 erforderlich.

<sup>4)</sup> Die Tabellenwerte gelten auch für Spannbetonbalken; die Mindestachsabstände  $u, u_m, u_s$  und  $u_0$  sind jedoch entsprechend den Angaben von Tabelle 1 um die folgenden  $\Delta u$ -Werte zu erhöhen:  
Bei vergüteten Drähten mit  $\text{crit } T = 450^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 5$  mm und  
bei kaltgezogenen Drähten und Litzen mit  $\text{crit } T = 350^\circ\text{C}$  um  $\Delta u = 15$  mm.  
Sofern  $u, u_0$  oder  $u_s$  mit 12 mm angegeben sind, dürfen die  $\Delta u$ -Werte um 2 mm verringert werden.

### 3.3 Zusammenfassung

Das Ergebnis der durchgeführten Forschungsarbeit zeigt, daß eine wesentlich wirtschaftlichere Bemessung von stabbündelbewehrten Stahlbetonbauteilen - auch bei Beachtung der gültigen brandschutztechnischen Sicherheitsanforderungen - möglich ist. Die formulierten Ergänzungen der bisherigen Bemessungsvorschriften nach DIN 4102 Teil 4 sollten möglichst bald bauaufsichtlich zugelassen werden, um eine Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Stahlbeton zu ermöglichen.

#### 4. Literaturangaben

- [1] Becker, J., Bizri, H., Bresler, B.:  
FIRES-T, A Computer Program for the Fire Response of Structures - Thermal,  
Berkeley, 1974.
  
- [2] Computer-Programm zur Traglastermittlung einachsig ausmittig gedrückter  
Stahlbetonstützen, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
der Technischen Universität Braunschweig.
  
- [3] Richter, E.:  
Rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit von im Spannbett vorgespannten  
Spannbetonbalken bei Brandbeanspruchung gemäß DIN 4102, II. Teil.  
Bericht des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der  
Technischen Universität Braunschweig (in Vorbereitung).
  
- [4] DIN 4102, Teil 2: Ausgabe Februar 1977)  
Teil 4: Ausgabe März 1981).
  
- [5] Klingsch, W.:  
Traglastberechnung instationär thermisch belasteter schlanker Stahl-  
betondruckglieder mittels zwei- und dreidimensionaler Diskretisierung.  
Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1976.  
Heft 33 des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der  
Technischen Universität Braunschweig.
  
- [6] Kordina, K.:  
Gutachtliche Stellungnahme Nr. G 81 7163 - Ri/Bd vom 24.04.1981
  
- [7] Ehm, H.: Rechnerische Ermittlung der Erwärmungsvorgänge von brand-  
beanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. DAfSt., Heft 230,  
Teil 2, 1975.

# A N L A G E N

zum Forschungsbericht:

"Brandverhalten von Stahlbetonbauteilen  
mit Stabbündelbewehrung"

Anlagenverzeichnis (die Bezeichnung der Anlagen bezieht sich auf die Kapitelnummern)

Anlage

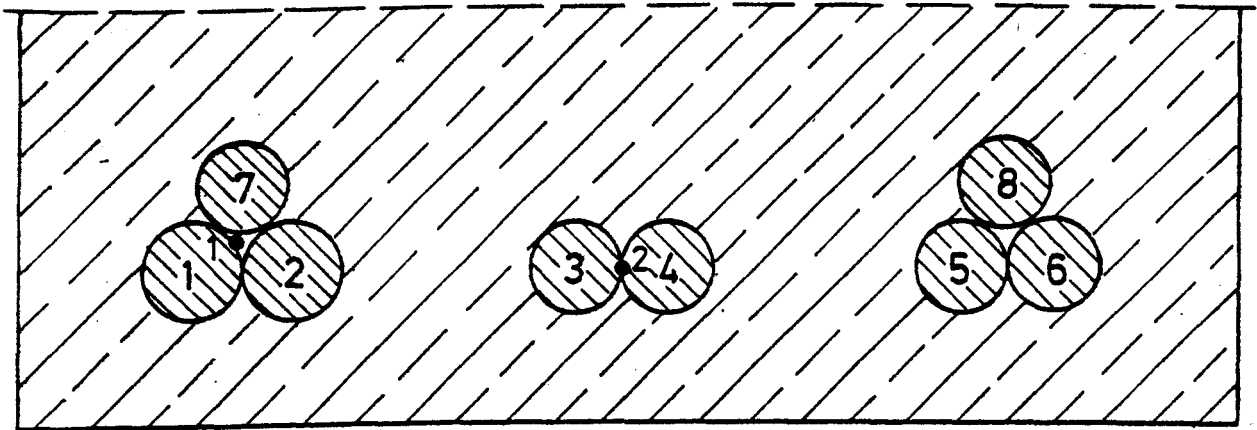
- 1.2.1.a Anordnung der Thermoelemente, Balken 1, Q 11
- 1.2.1.b Anordnung der Thermoelemente, Balken 1, Q 12
- 1.2.1.c Anordnung der Thermoelemente, Balken 1, Q 13
- 1.2.2.a Querschnittsdarstellung, Balken 1 und 2, Q 11 ÷ 13, Q 21 ÷ 23
- 1.2.2.b Querschnittsdarstellung, Balken 3, Q 31 ÷ 33
- 1.2.2.c Querschnittsdarstellung, Balken 4, Q 41 ÷ 43
- 1.2.2.d Querschnittsdarstellung, Balken 5, Q 51 ÷ 53
- 1.3 Versuchsaufbau Deckenbrandhaus
- 1.4.1.a Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken 1, Q 12
- 1.4.1.b Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken 1, Q 12
- 1.4.1.c Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken 1, Q 13
- 1.4.2.a Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 11
- 1.4.2.b Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 12
- 1.4.2.c Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 12
- 1.4.2.d Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 13
- 1.4.2.e Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 33
- 1.4.2.f Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 31
- 1.4.2.g Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 31
- 1.4.2.h Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 41
- 1.4.2.i Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 42
- 1.4.2.j Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 42
- 1.4.2.k Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 43
- 1.4.2.l Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 41



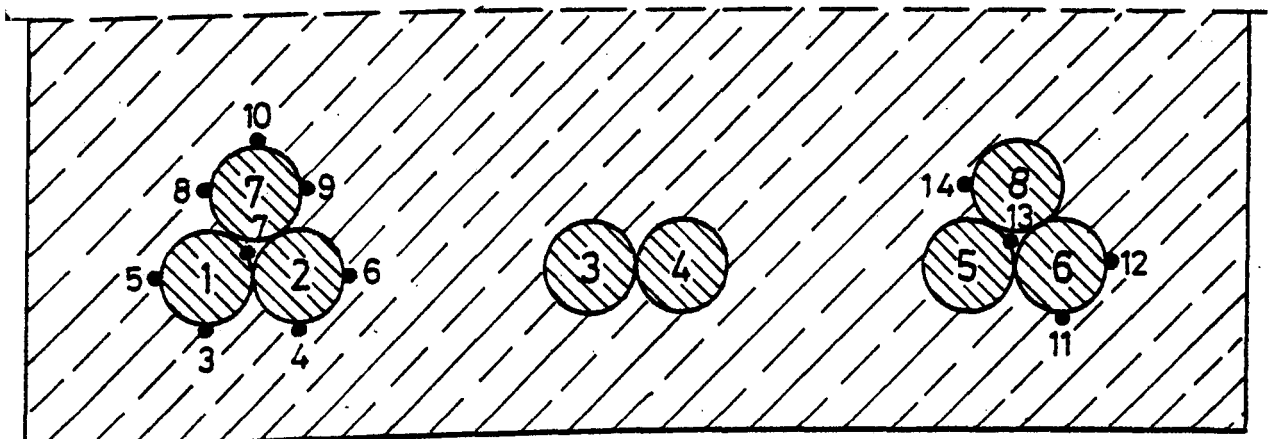
## Anlage

- 1.4.2.m Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 51
- 1.4.2.n Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 52
- 1.4.2.o Abweichung der Stabtemperaturen von der mittleren Bündeltemperatur, Q 53
  
- 1.5.a Temperaturverlauf an den Bündeln - Rechenwerte, Balken 1, Q 11 (Q 12)
- 1.5.b Temperaturverlauf an den Bündeln - Rechenwerte, Balken 1, Q 11 (Q 12)
- 1.5.c Temperaturverlauf an den Bündeln - Rechenwerte, Balken 1, Q 12
  
- 2.1-1 Bewehrung Balken SB-1
- 2.1-2 Bewehrung Balken SB-2
- 2.1-3 Bewehrung Stütze SB-3
- 2.1-4 Thermoelemente Balken SB-1
- 2.1-5 Thermoelemente Balken SB-2
- 2.1-6 Anordnung der Thermoelemente, Stütze SB-3
  
- 2.3.2.a Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-1
- 2.3.2.b Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-1
- 2.3.2.c Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-1
- 2.3.2.d Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-2
- 2.3.2.e Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-2
- 2.3.2.f Temperaturverlauf an den Bündeln, Balken SB-2
- 2.3.2.g Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.h Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.i Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.j Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.k Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.l Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.m Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.n Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.o Temperaturverlauf an den Bündeln, Stütze SB-3
- 2.3.2.p Durchbiegung, Durchbiegungsgeschwindigkeit, Balken SB-1
- 2.3.2.q Durchbiegung, Durchbiegungsgeschwindigkeit, Balken SB-2
- 2.3.2.r Längenänderung, Ausbiegung Stütze SB-3

Meßquerschnitt 1



Meßquerschnitt 2

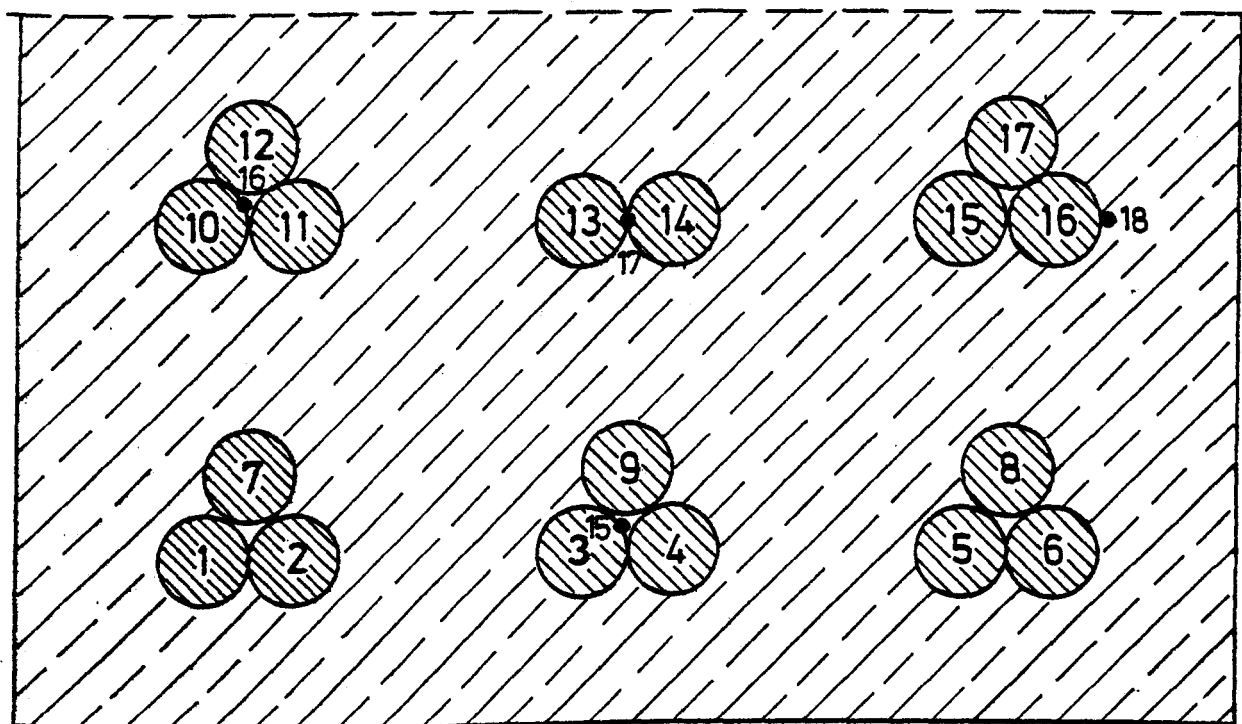


## STABBÜNDEL IM BRAND

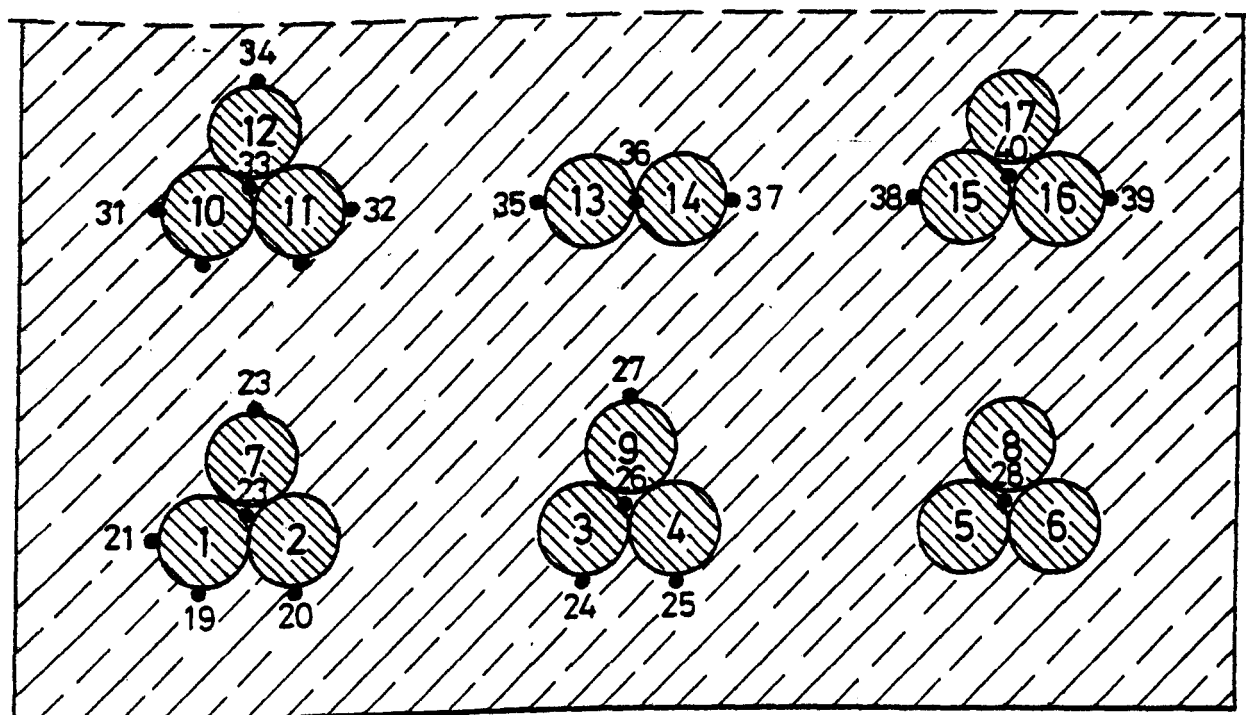
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
1.2.1.a

Meßquerschnitt 1



Meßquerschnitt 2

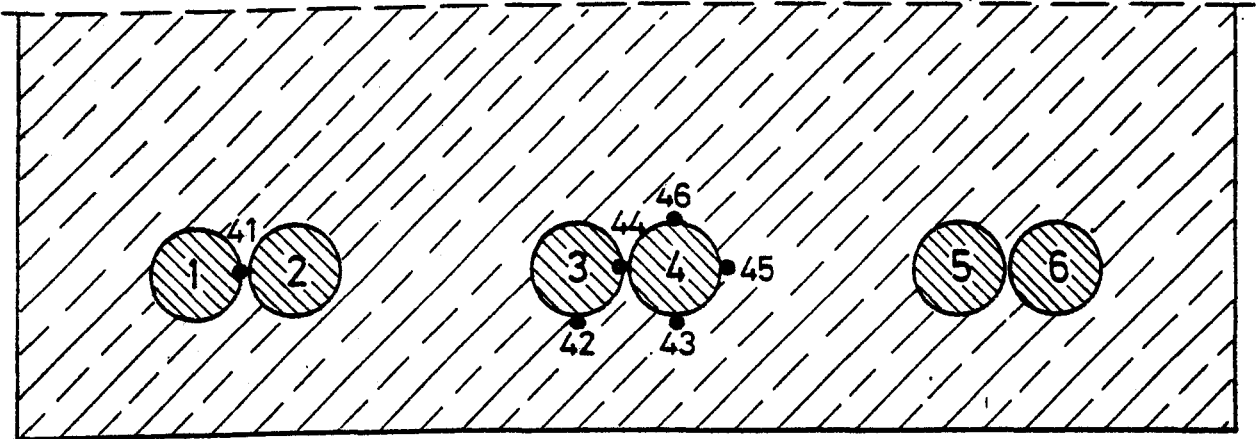


## STABBÜNDEL IM BRAND

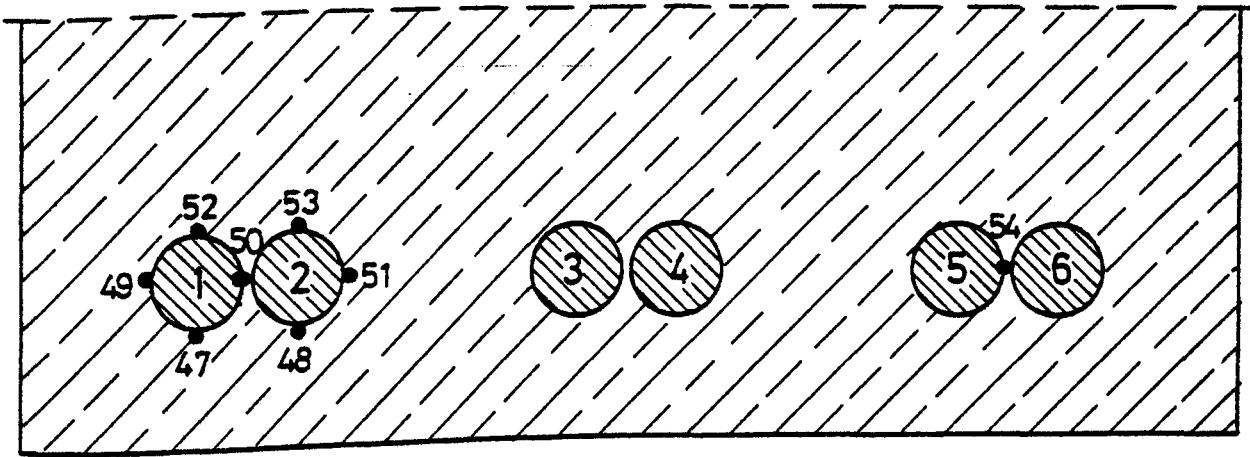
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

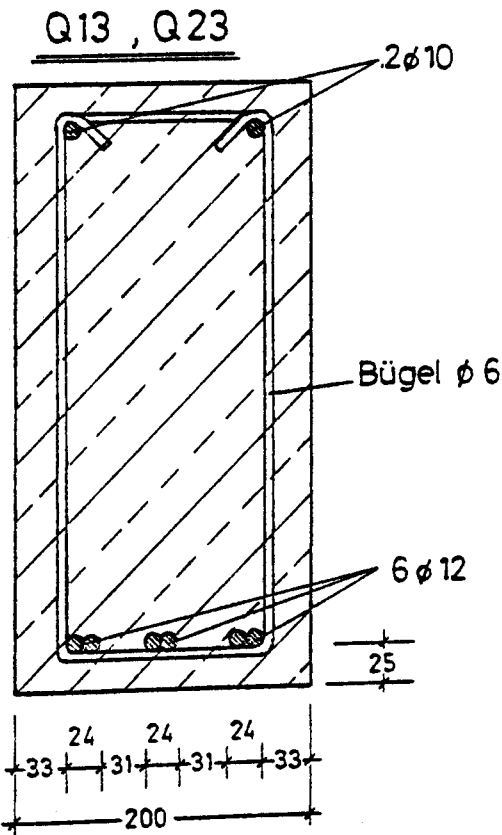
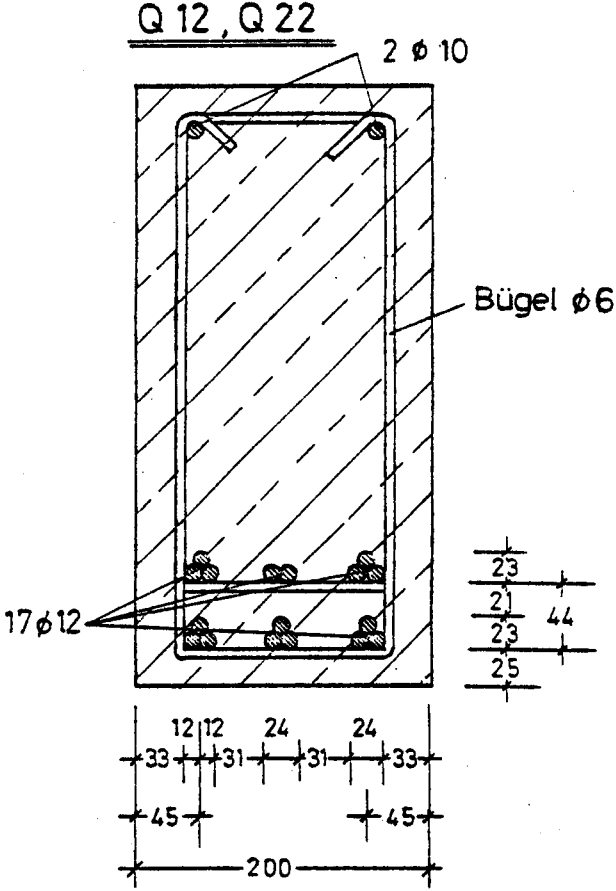
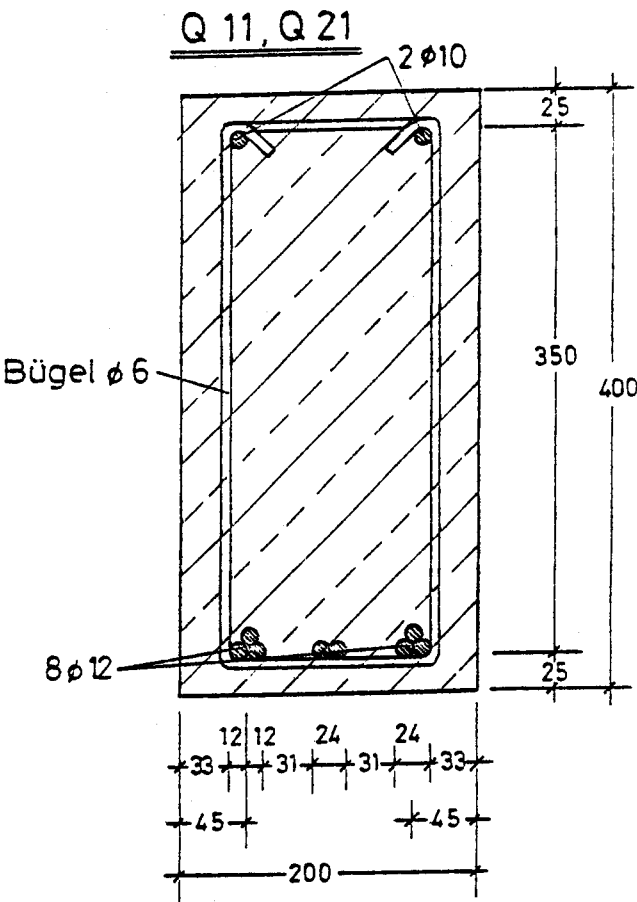
Anlage  
1.2.1.b

Meßquerschnitt 1



Meßquerschnitt 2

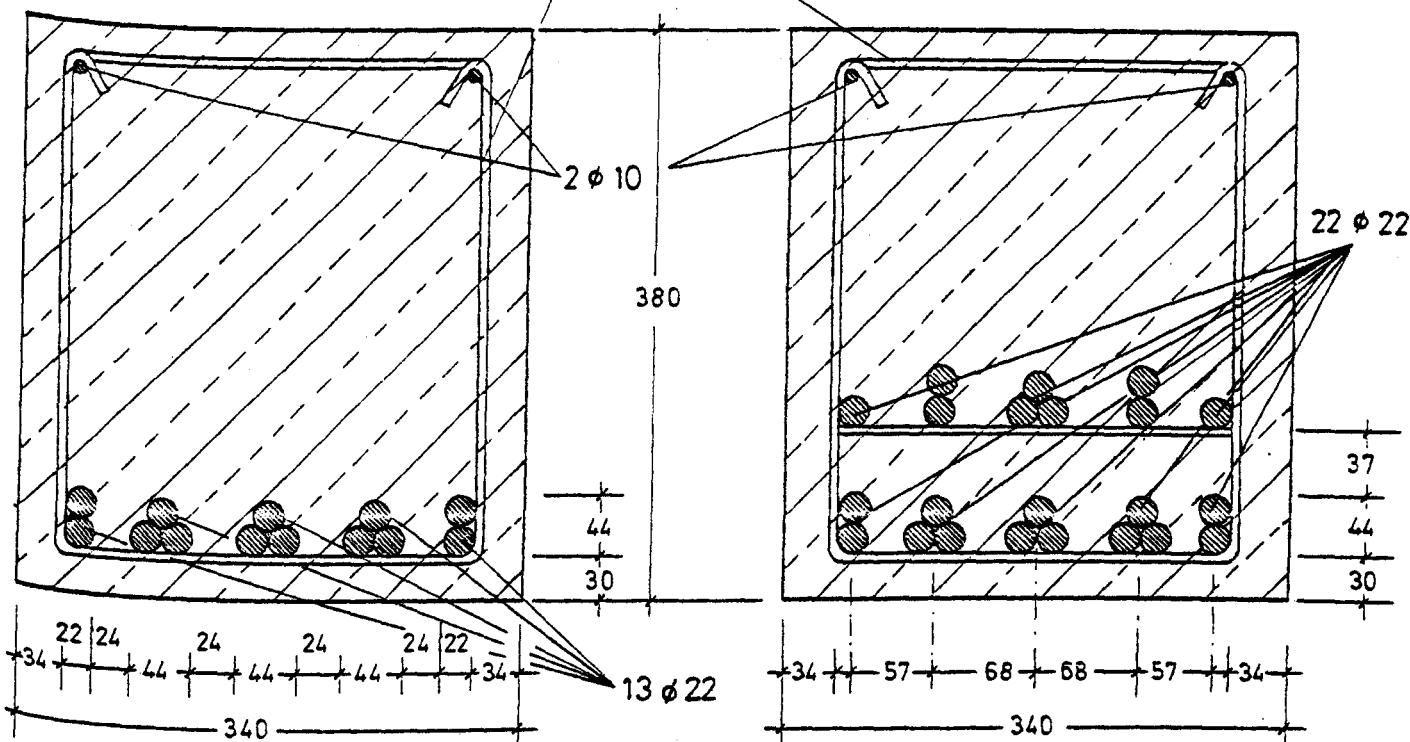




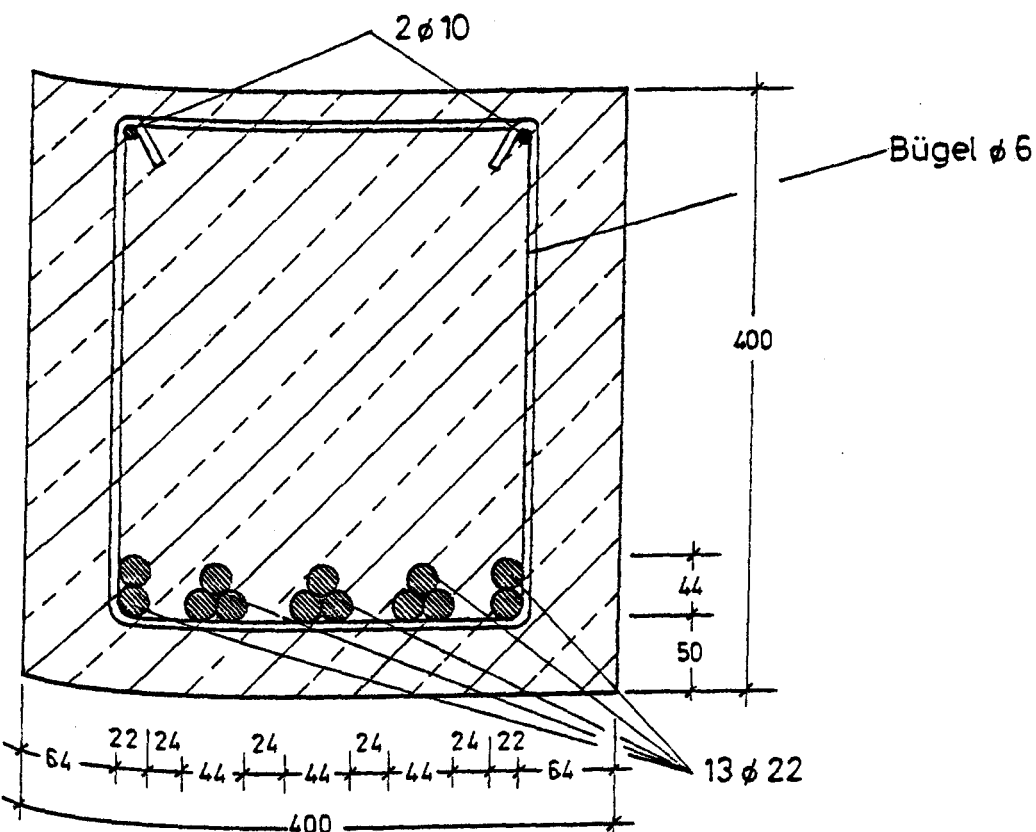
Q 31

Bügel  $\phi 6$

Q 32



Q 33



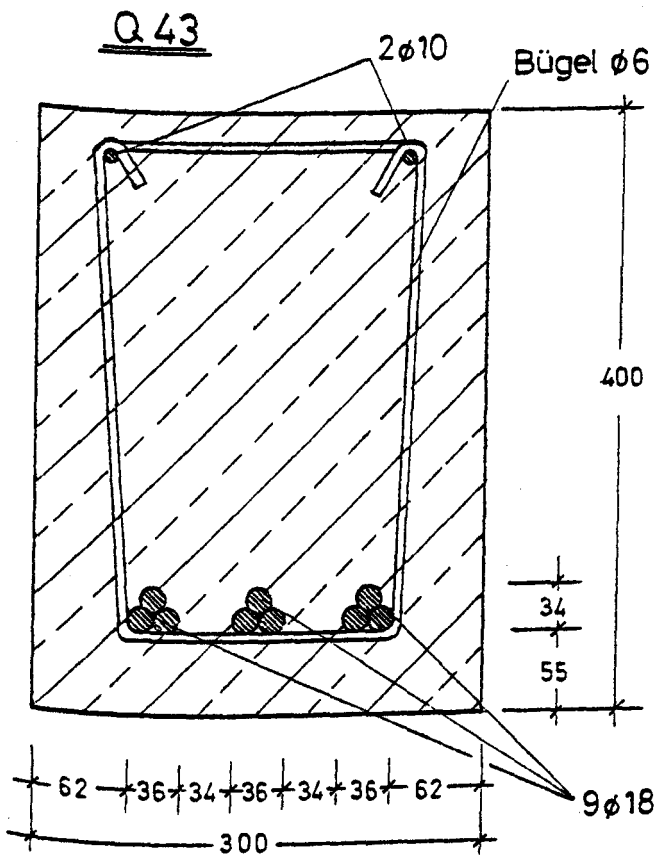
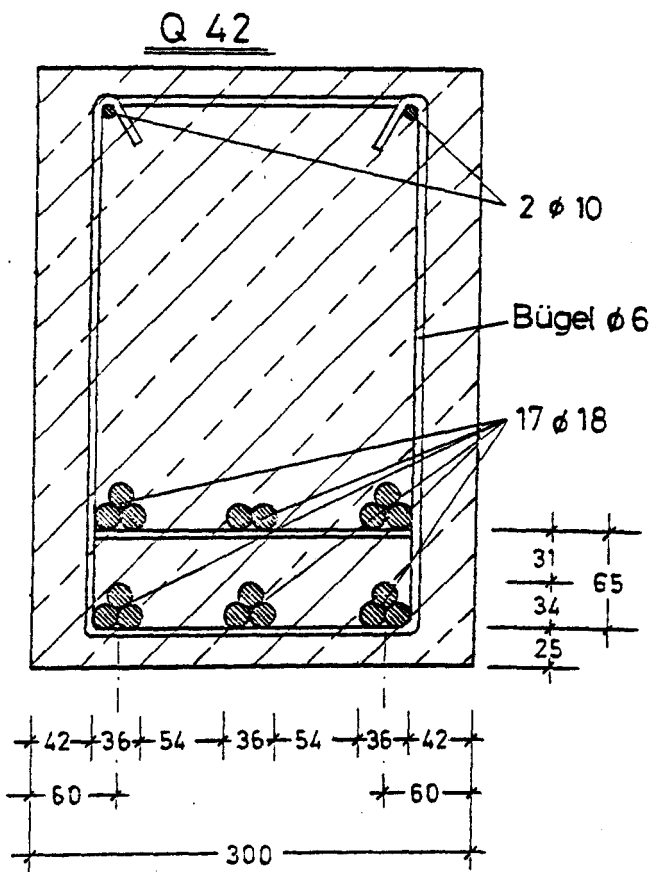
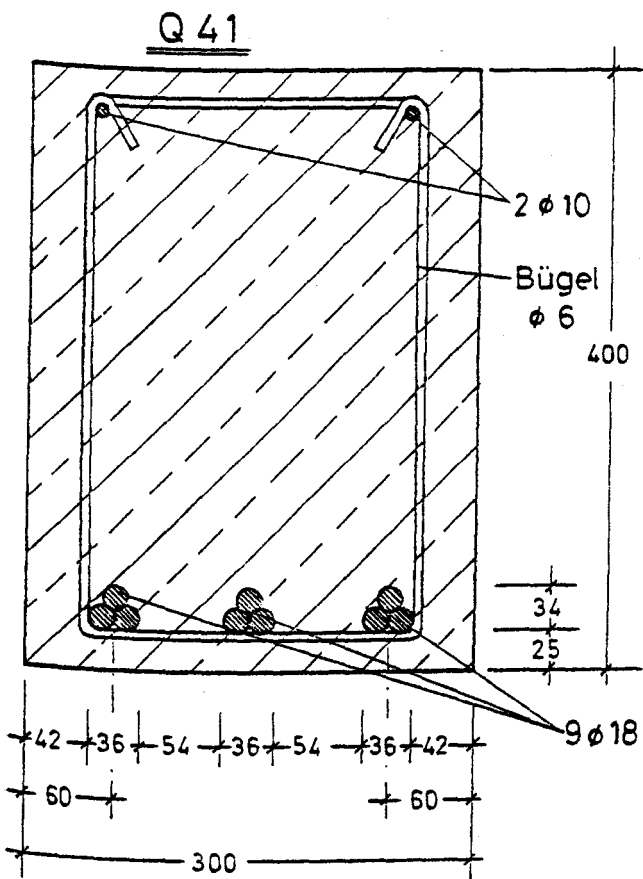
STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.2.2 b

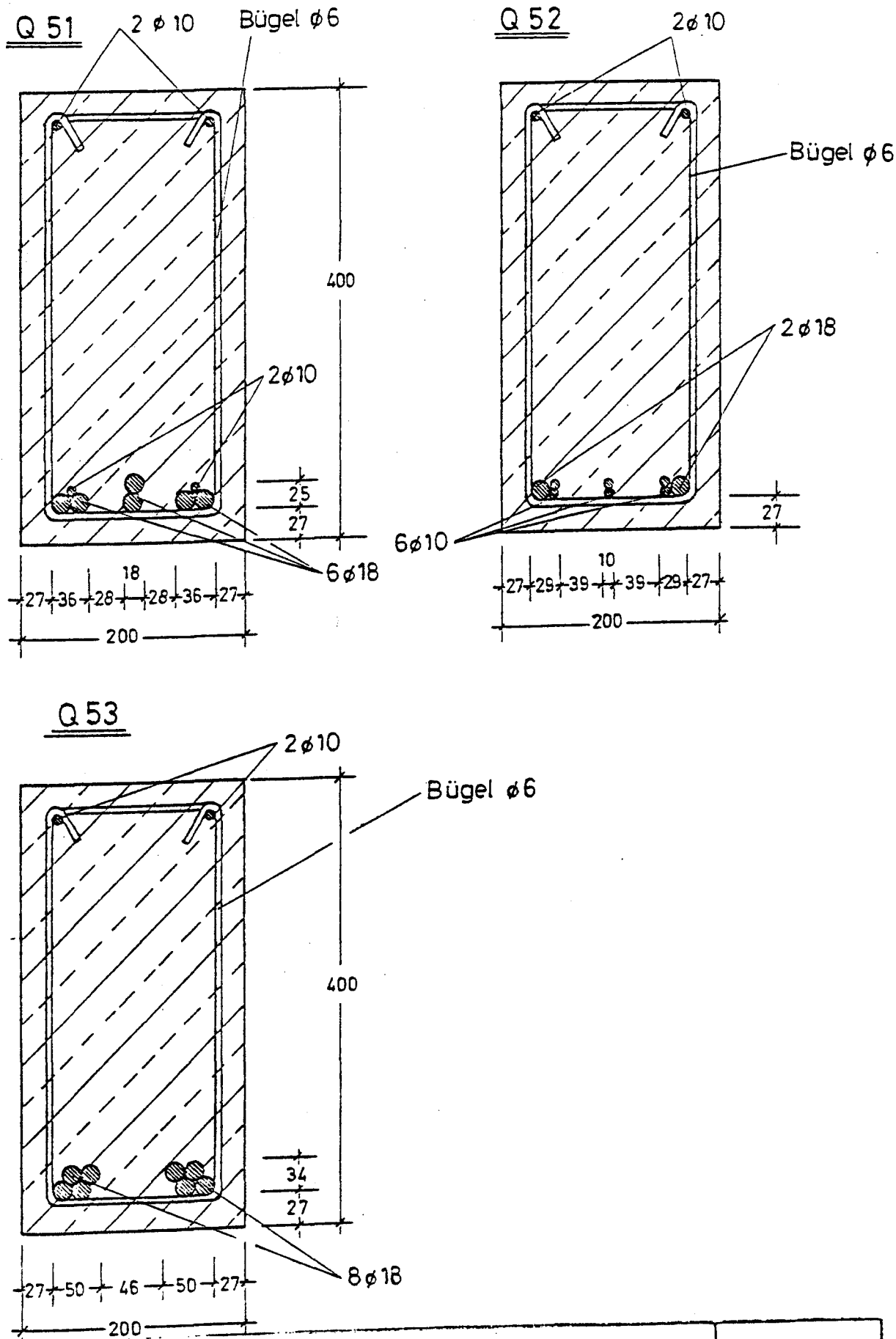


STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.2.2 c



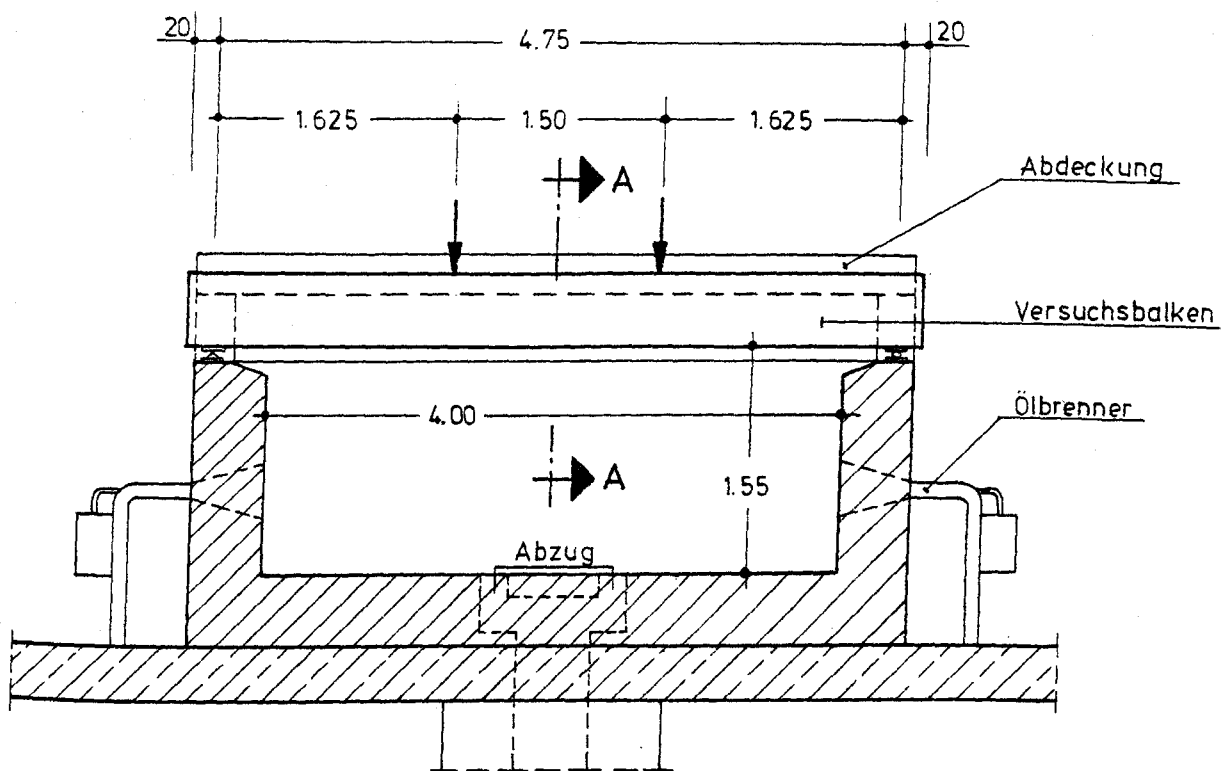
STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

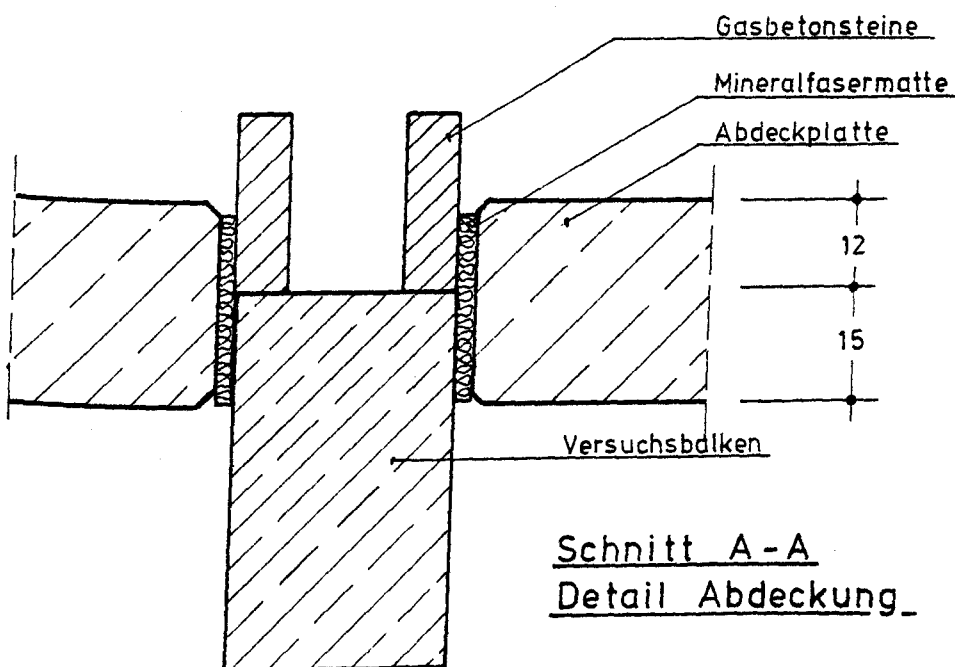
Anlage

1.2.2 d

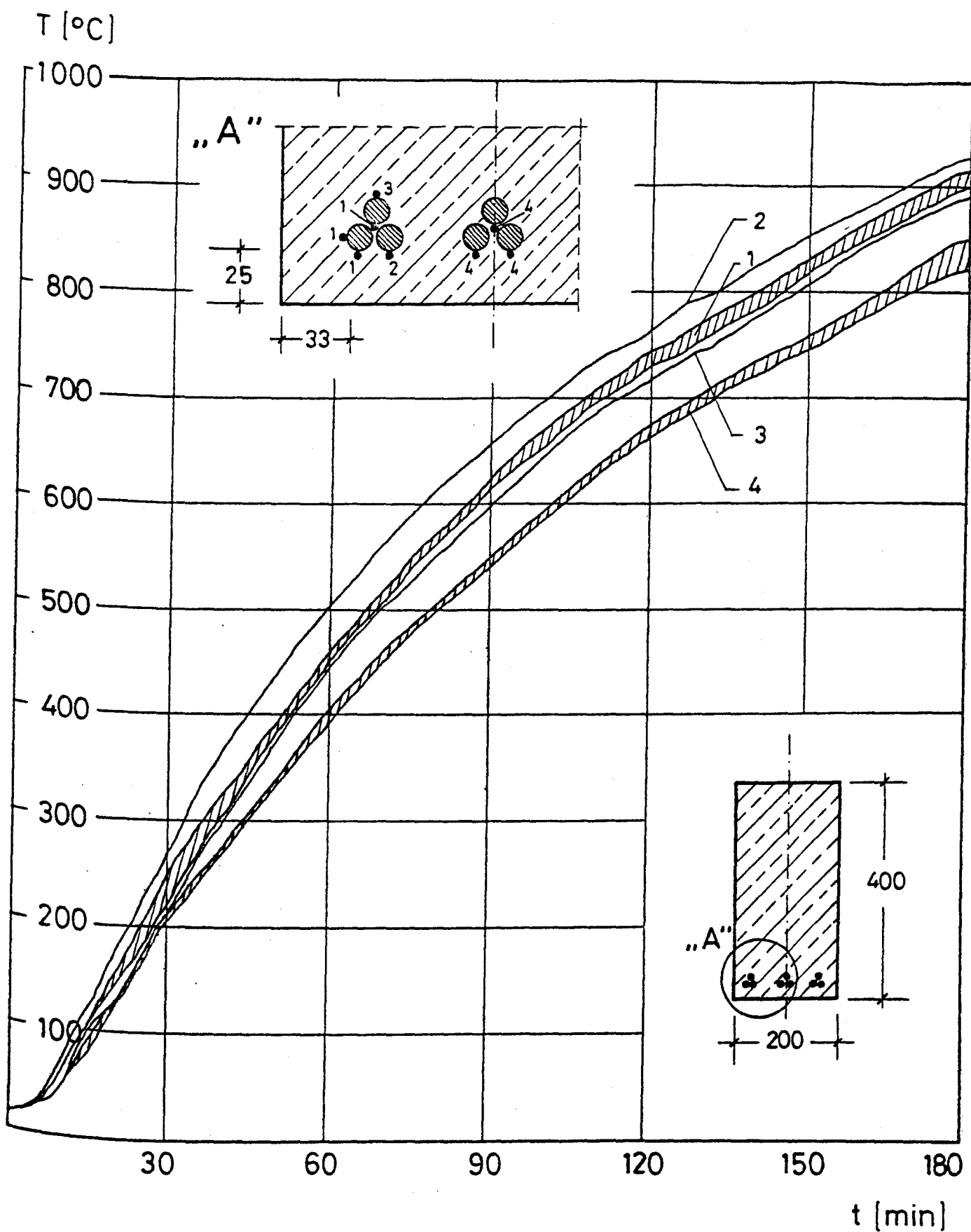




Brandhaus und Lagerungsbedingungen



Schnitt A-A  
Detail Abdeckung



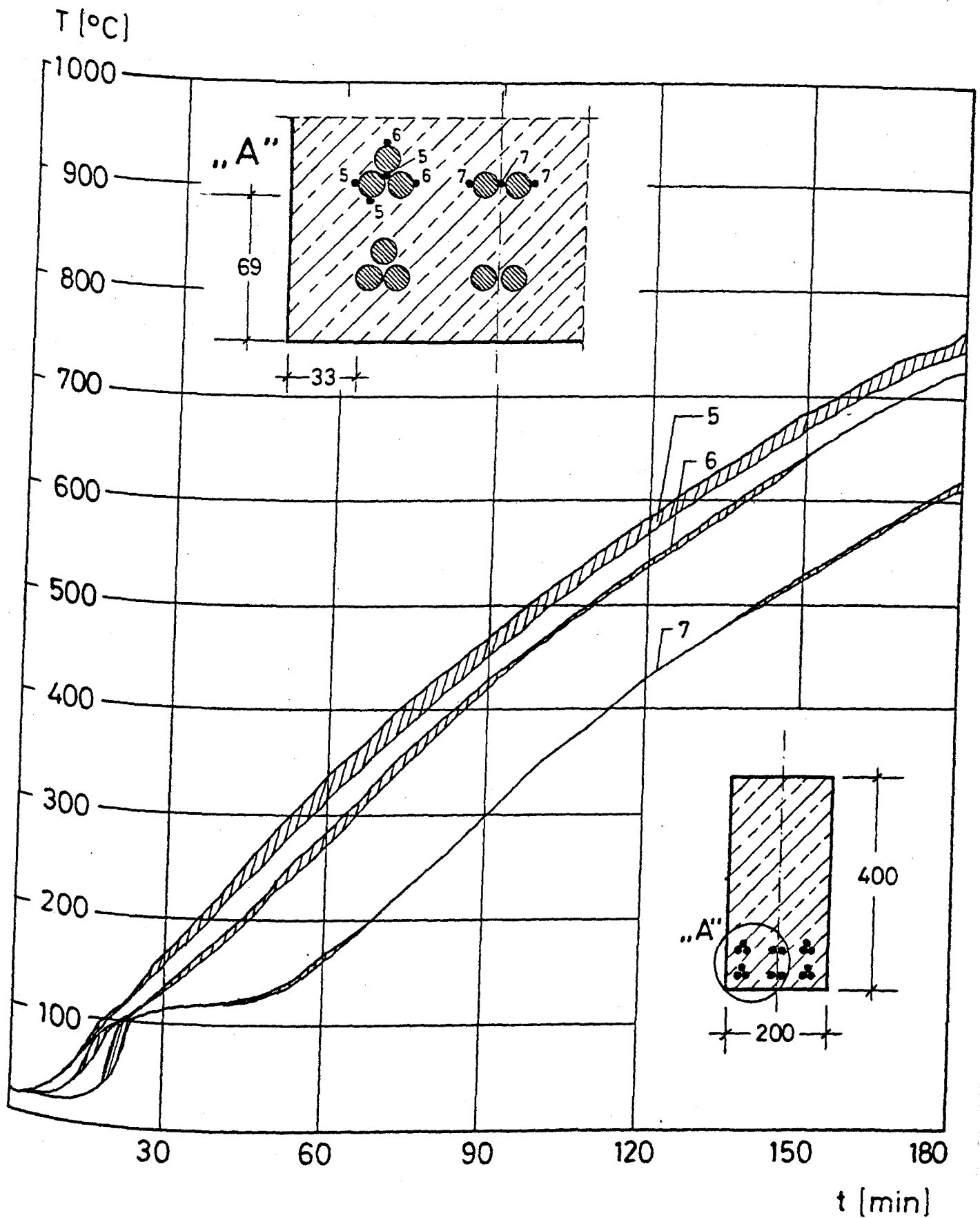
STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

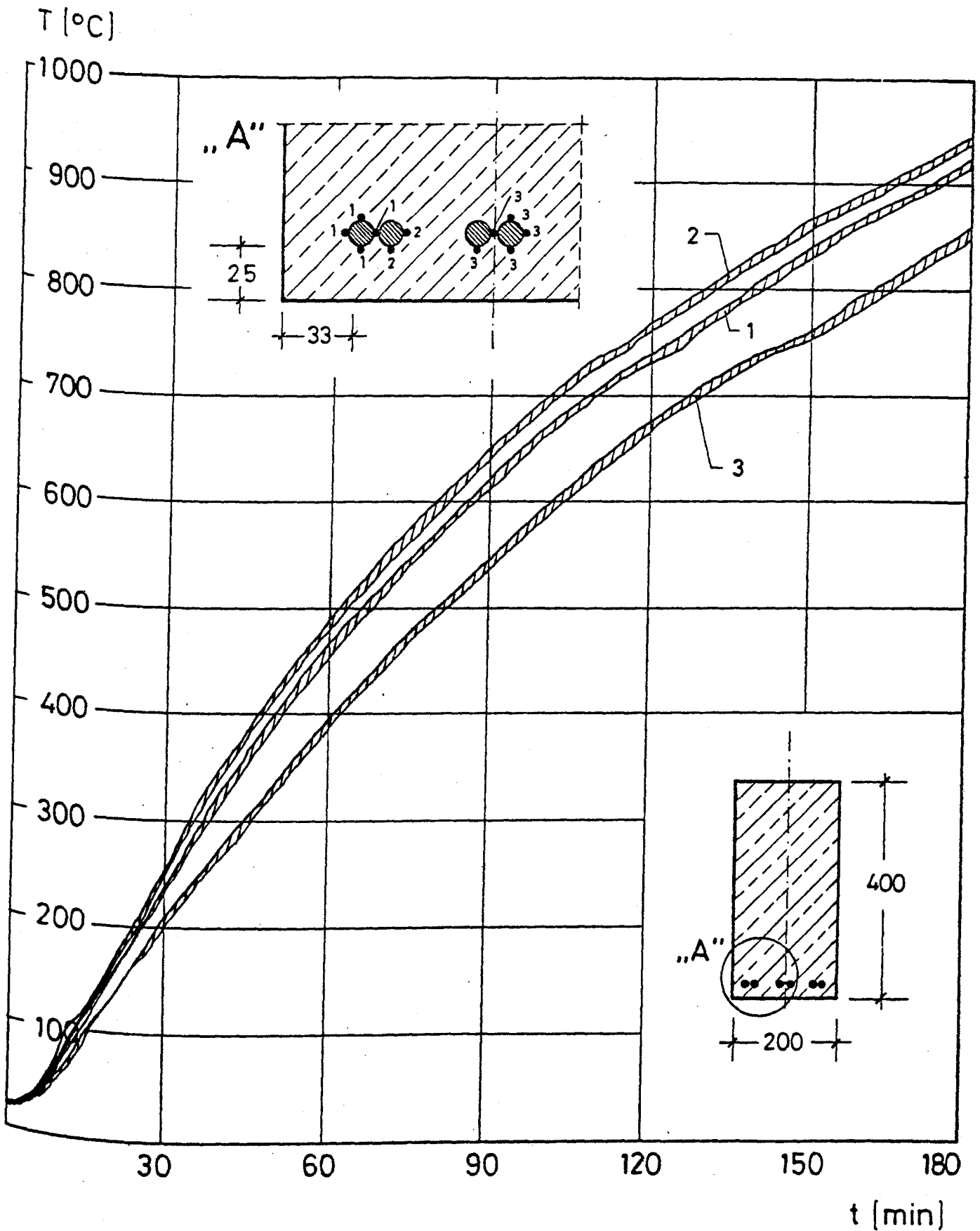
1.4.1.a



## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
1.4.1.b



STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

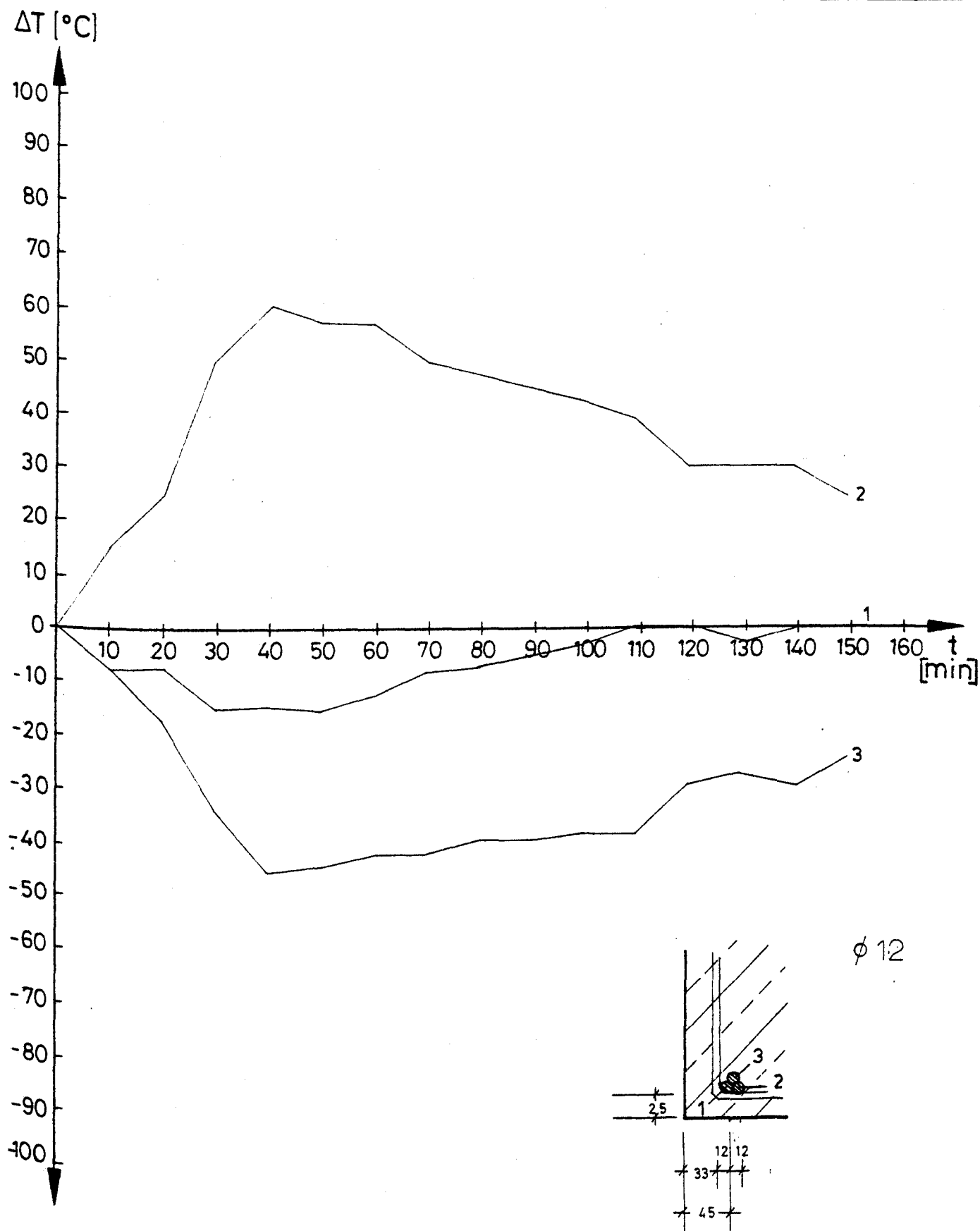
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.1.c

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 11



## STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

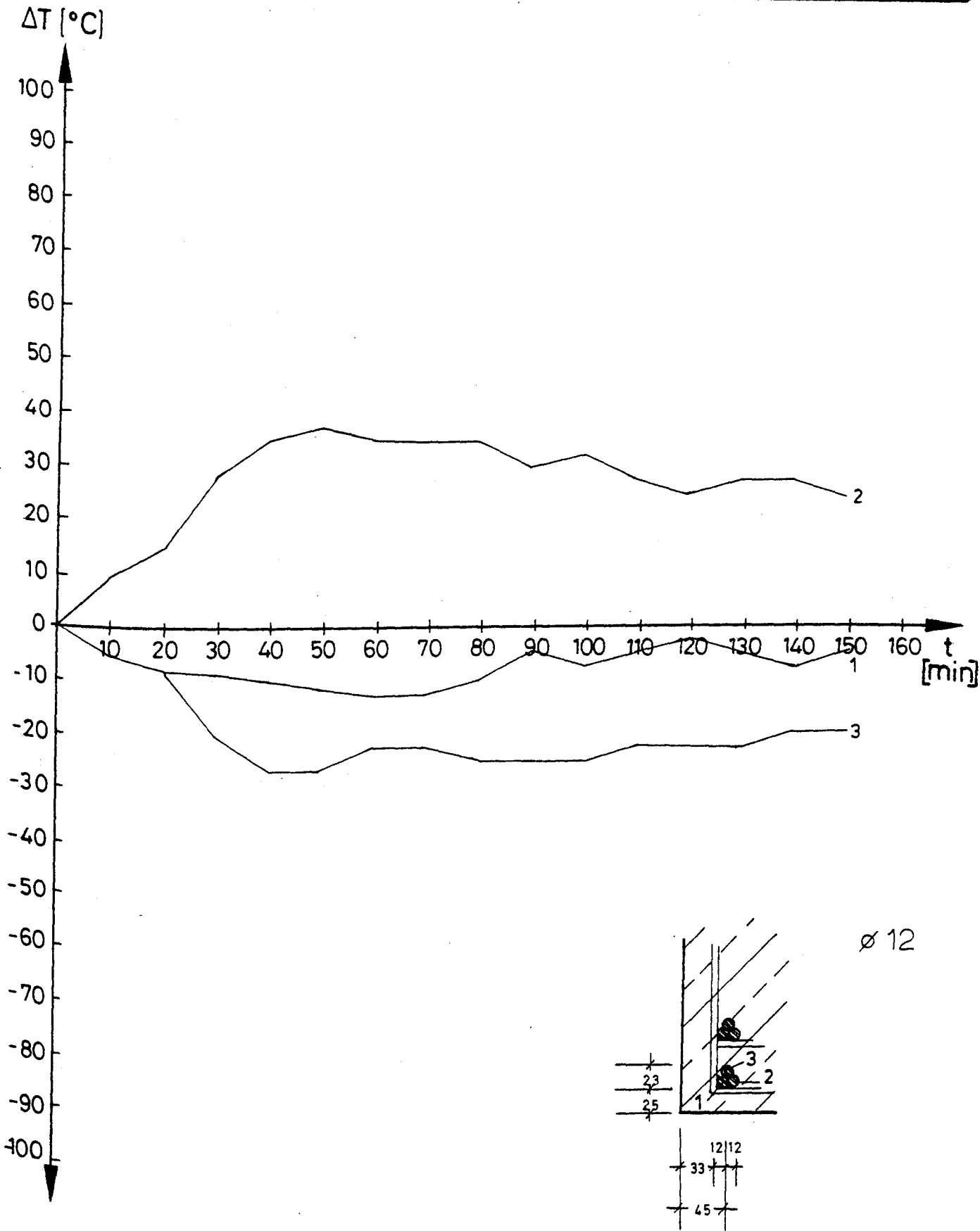
1.4.2.a

Technische Universität Braunschweig

25/02/2011

ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN  
VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 12



STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

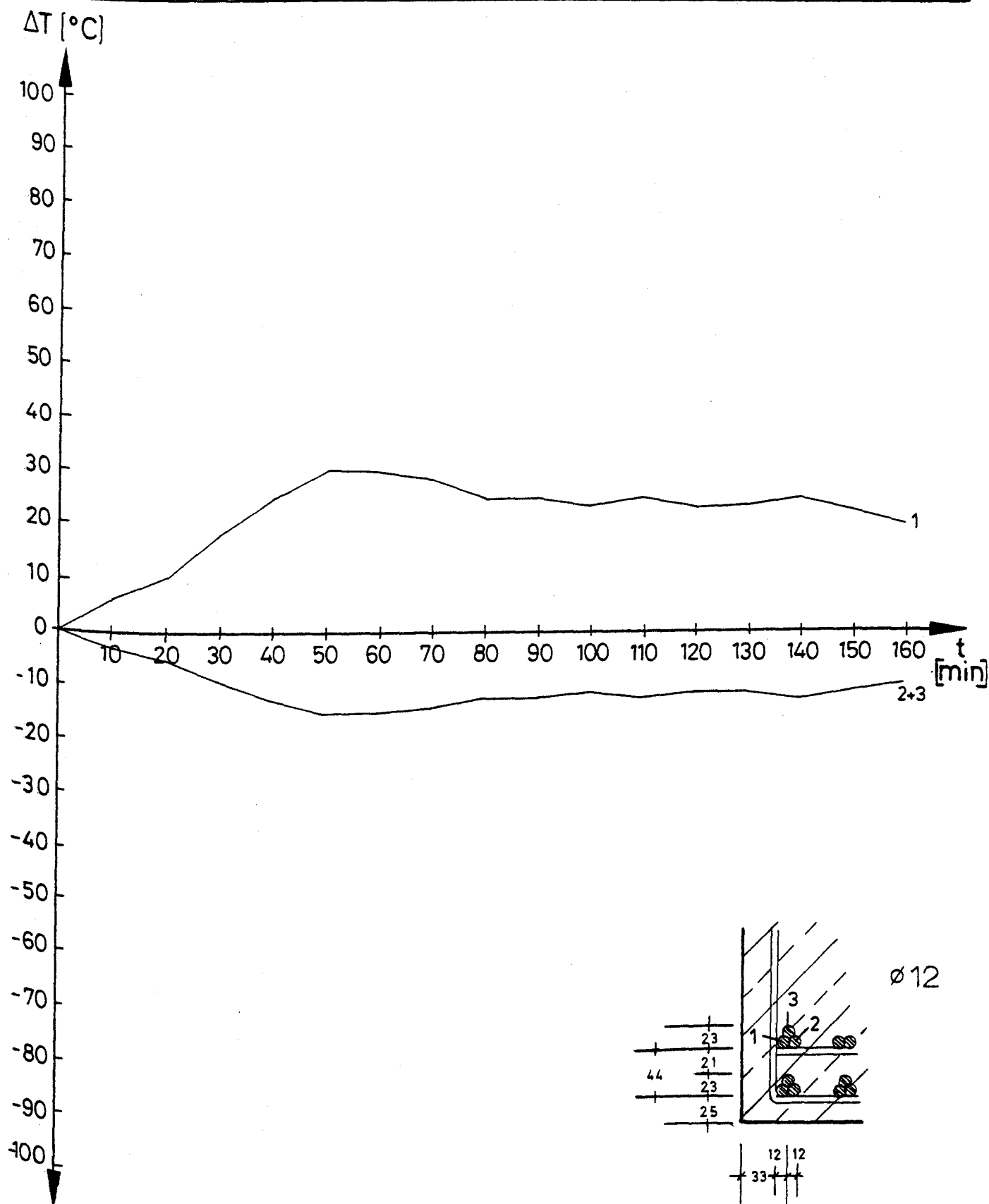
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.b

Technische Universität Braunschweig

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 12



## STABBÜNDEL IM BRAND

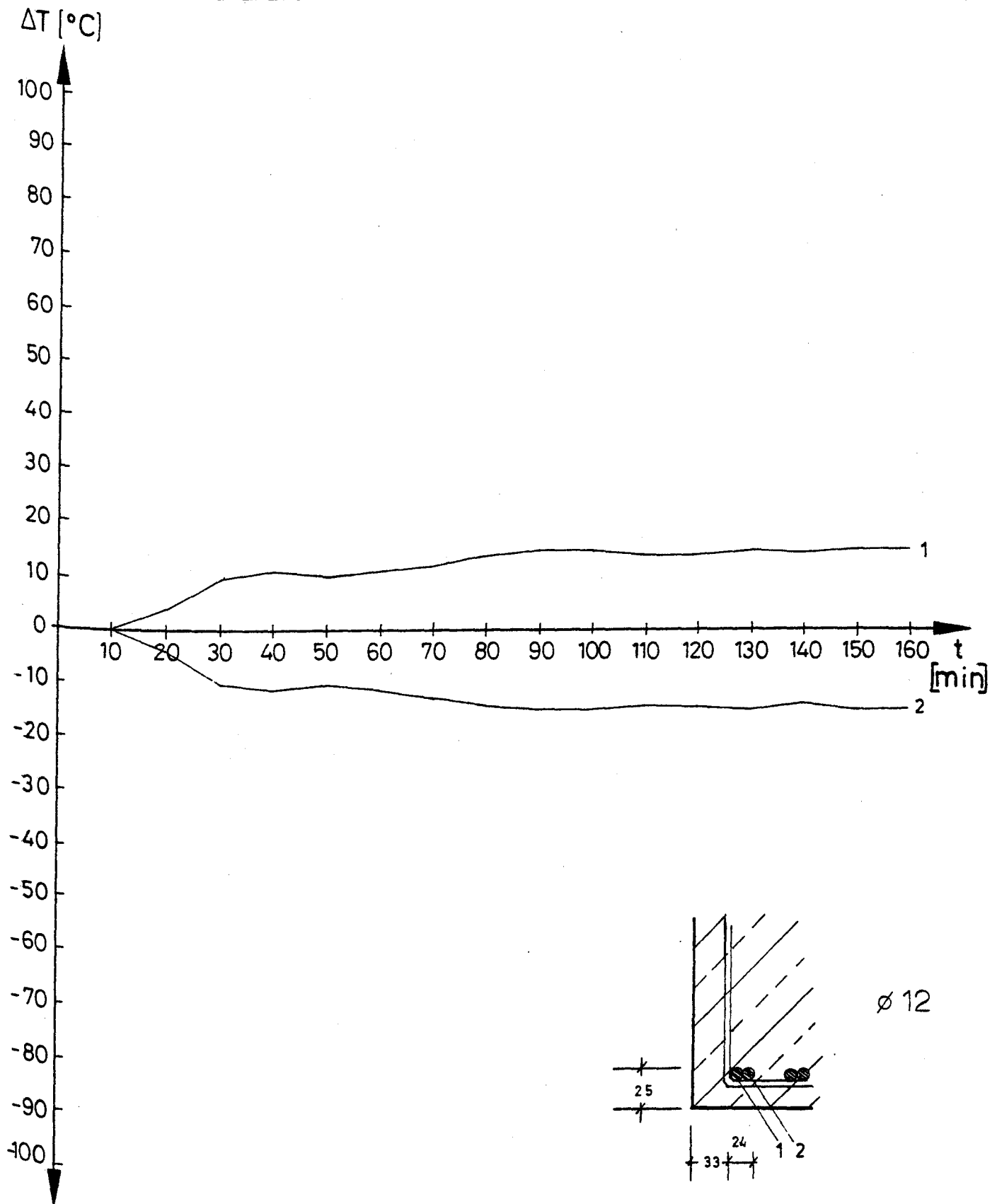
Anlage

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.c

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 13



## STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

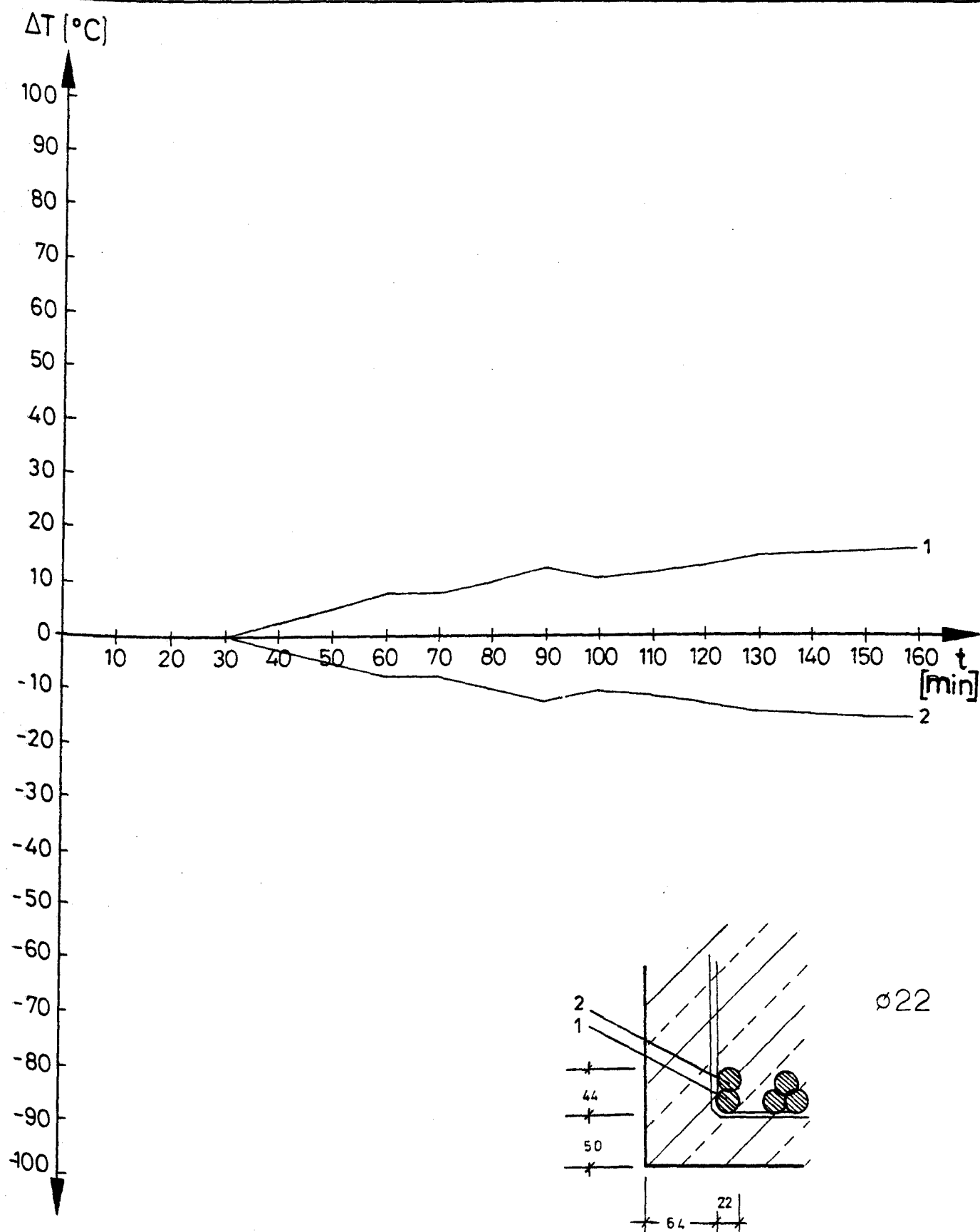
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.d



# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 33



## STABBÜNDEL IM BRAND

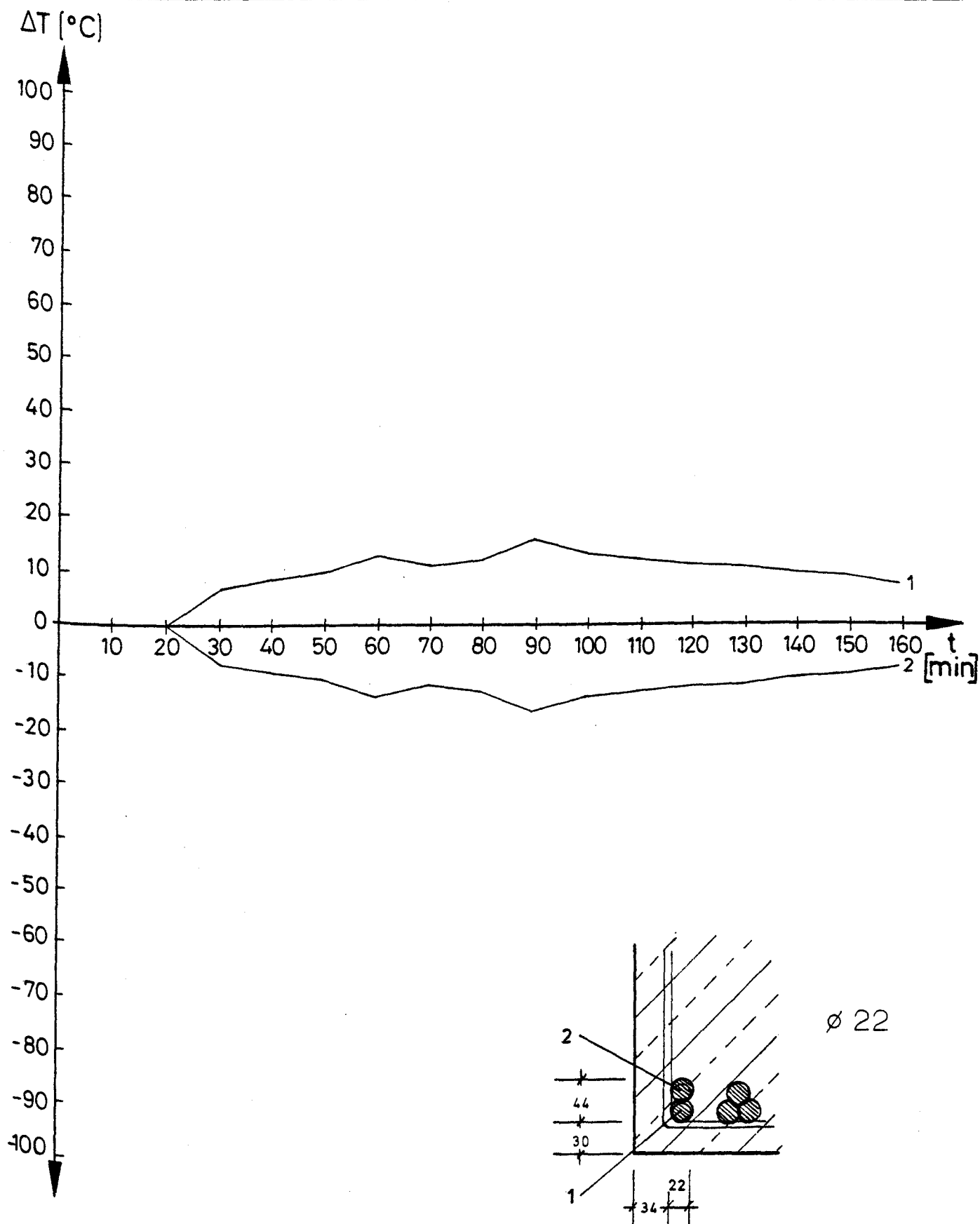
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.2.e

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 31



## STABBÜNDEL IM BRAND

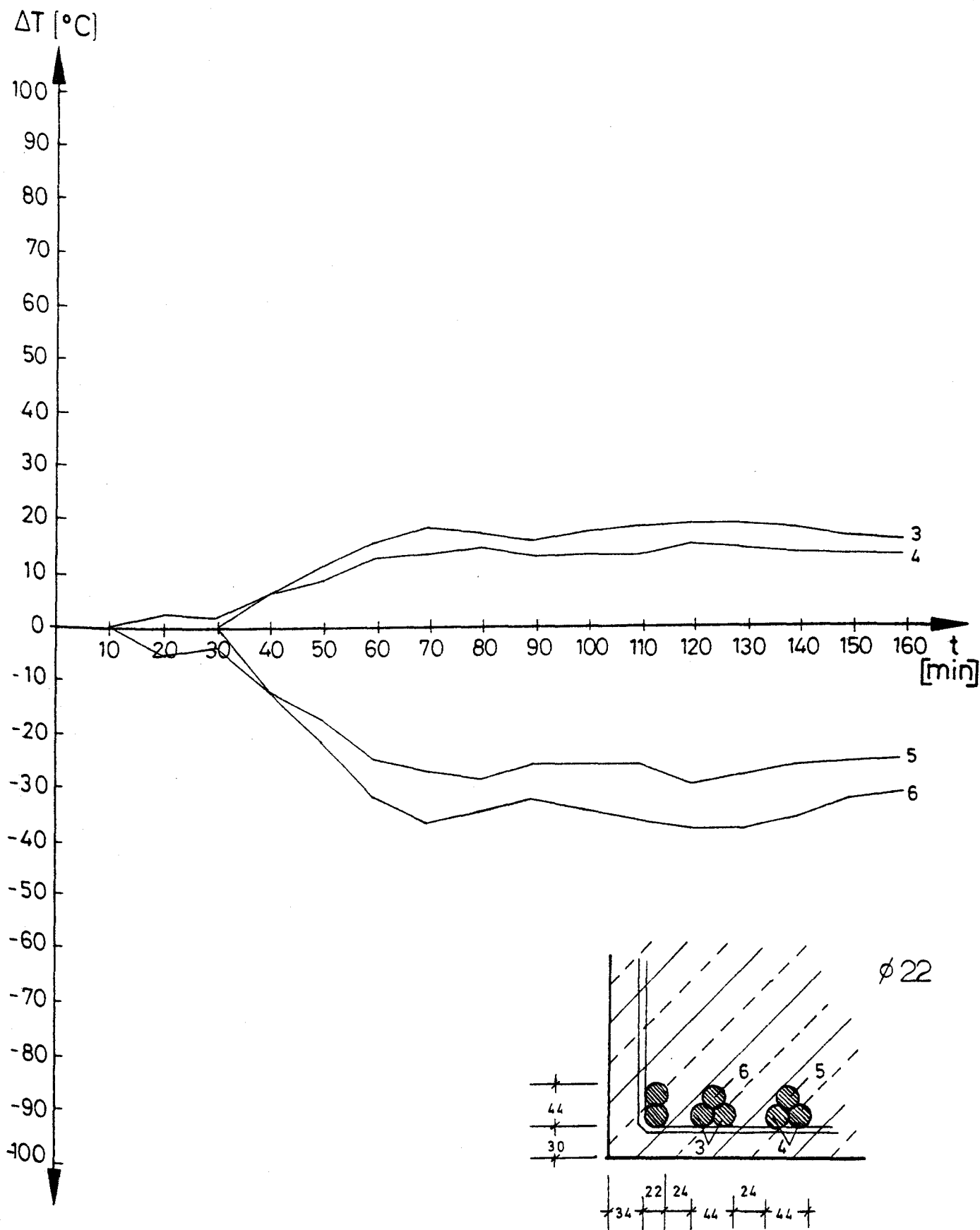
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.2.f

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 31



## STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

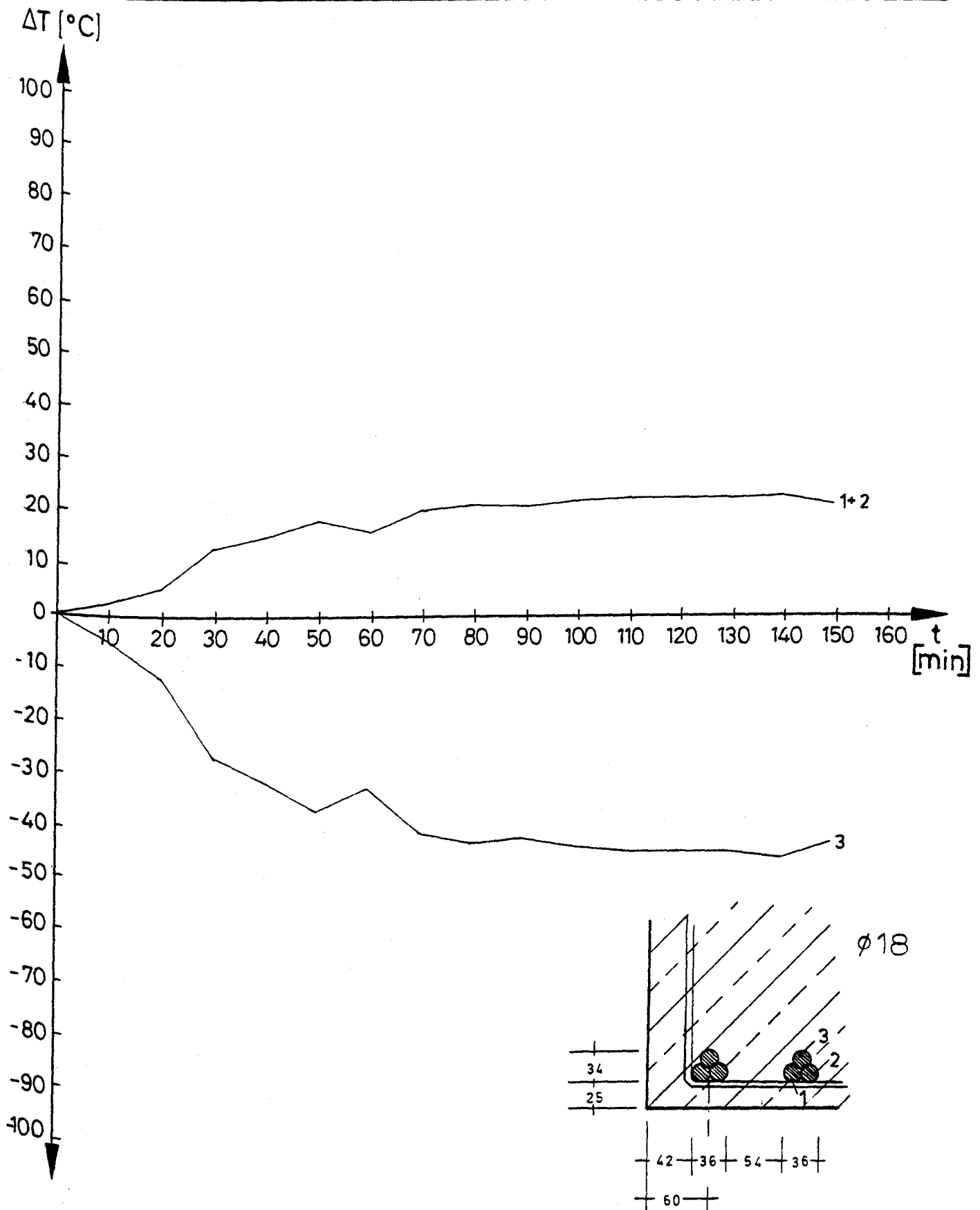
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.g

Technische Universität Braunschweig

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 41



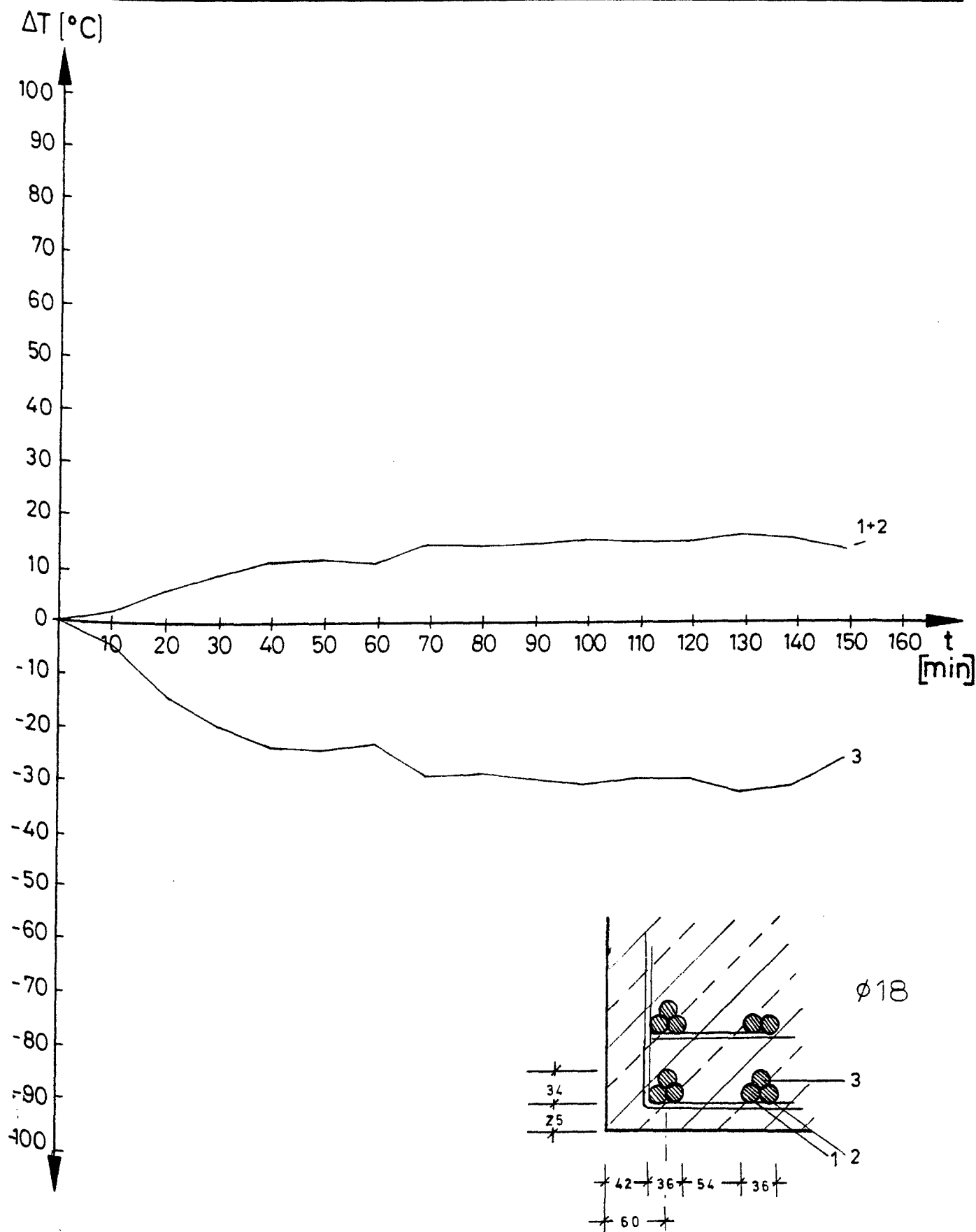
## STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

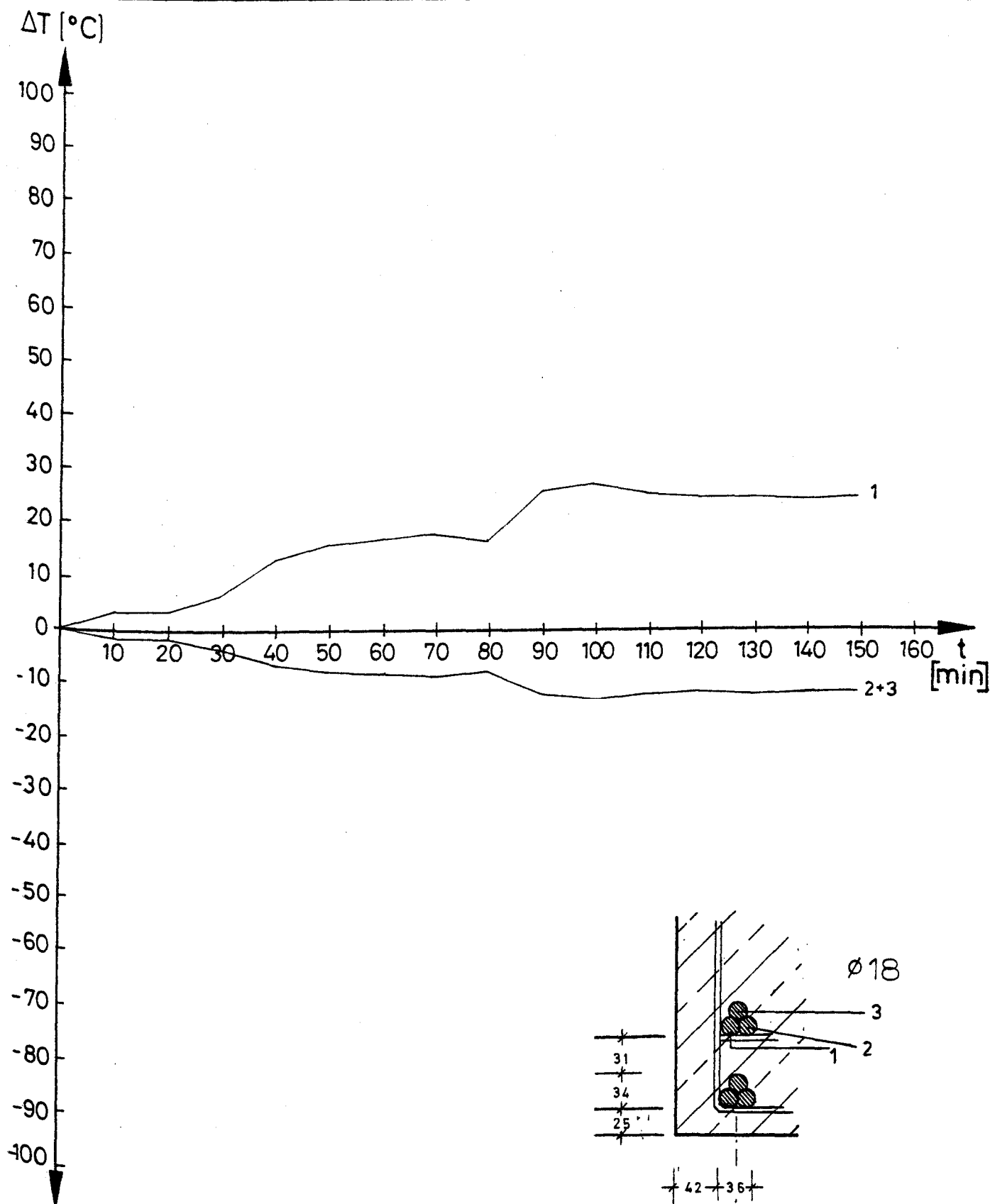
1.4.2.h

Technische Universität Braunschweig



# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 42



## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

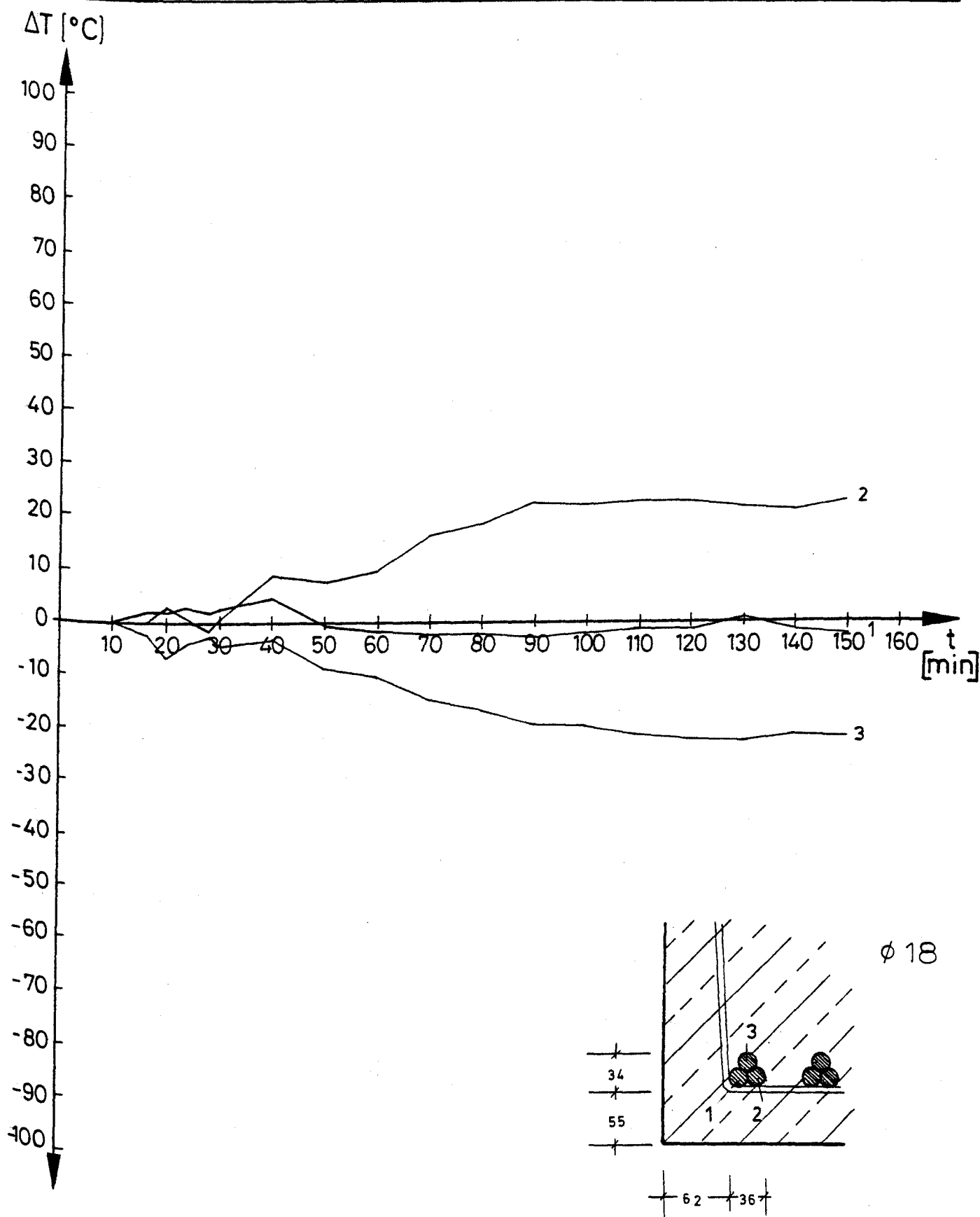
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.2.j

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 43



## STABBÜNDEL IM BRAND

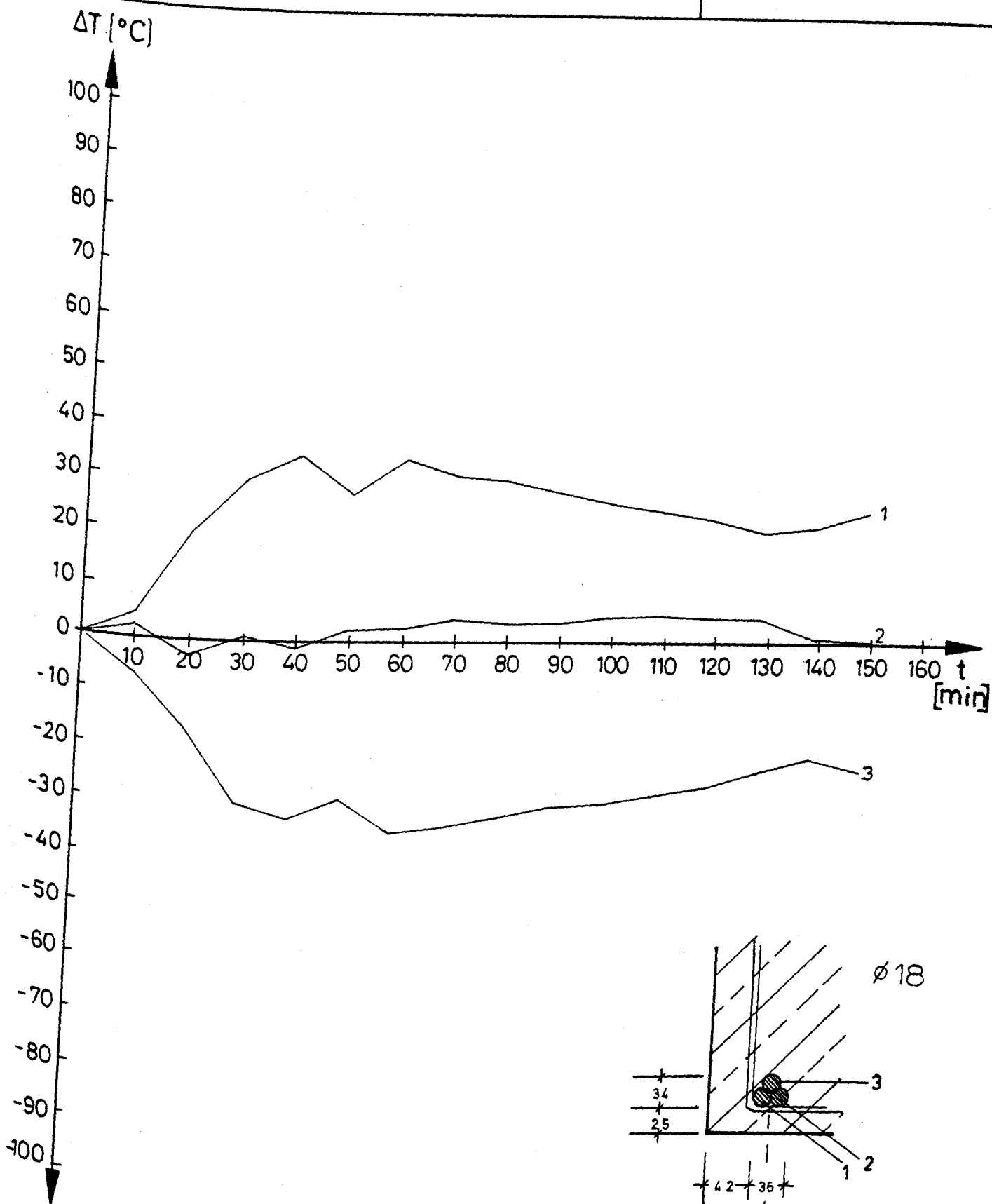
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.2.k

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 41



## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

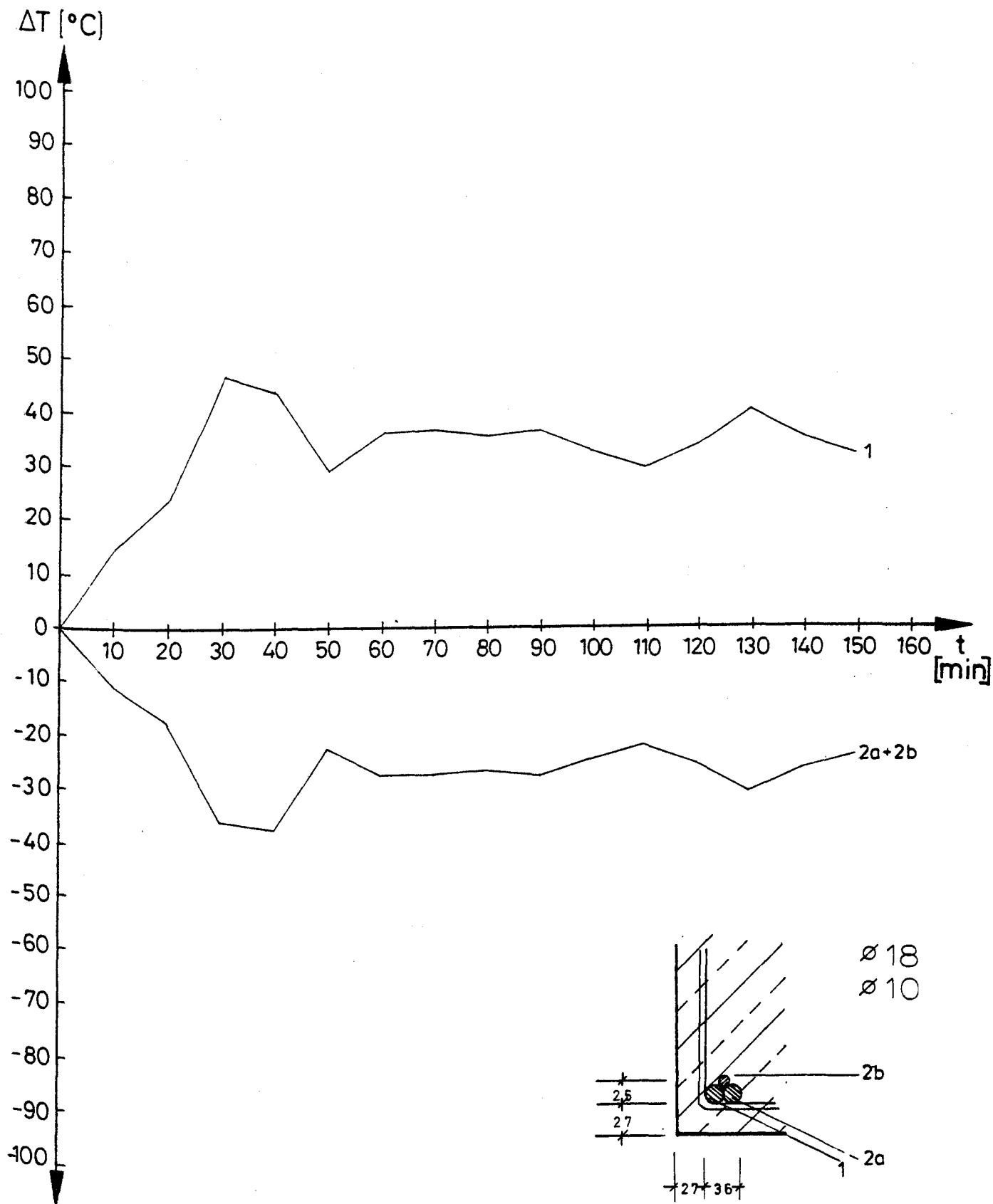
Anlage

1.4.2.1



# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 51



## STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

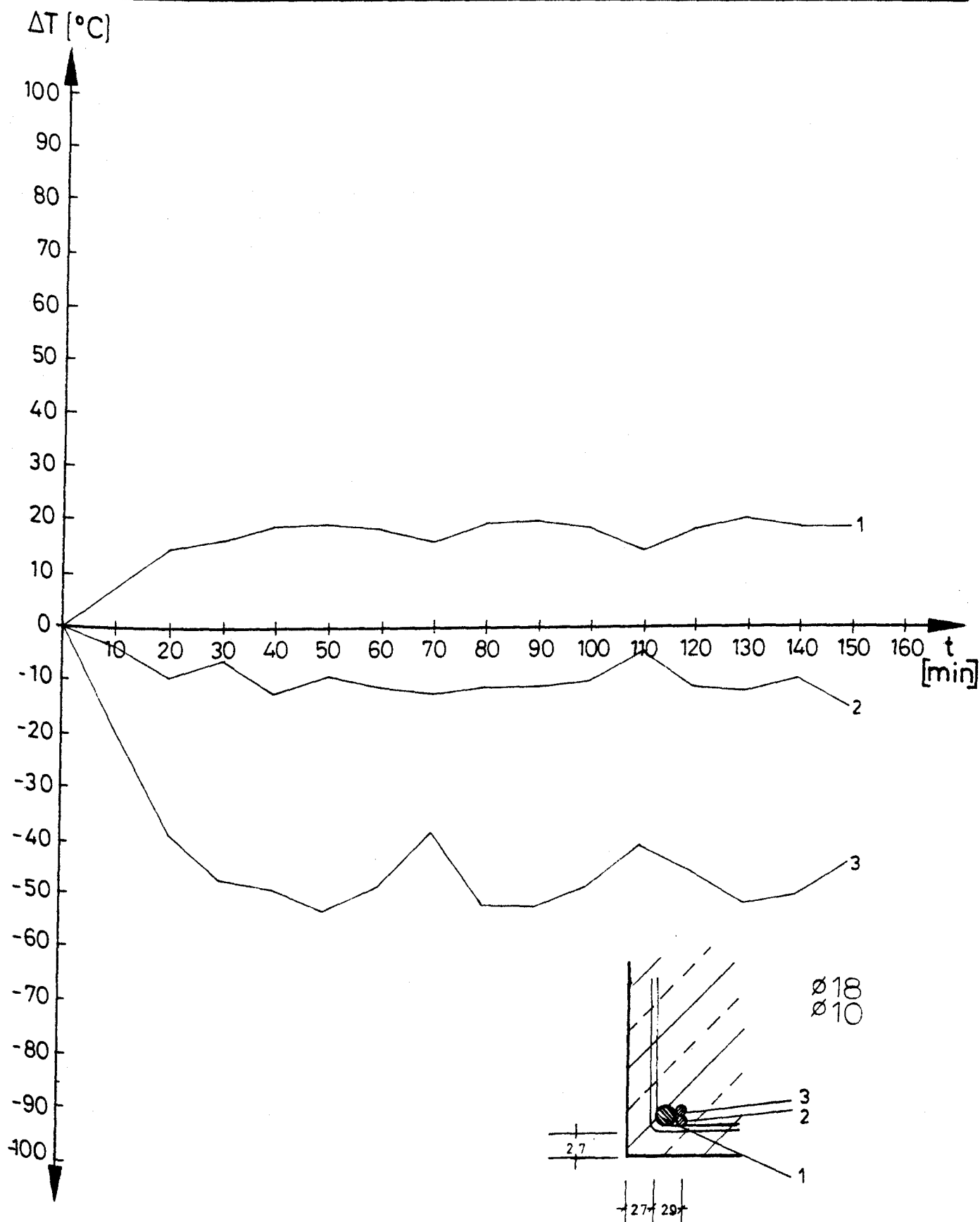
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.m

Technische Universität Braunschweig

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 52



## STABBÜNDEL IM BRAND

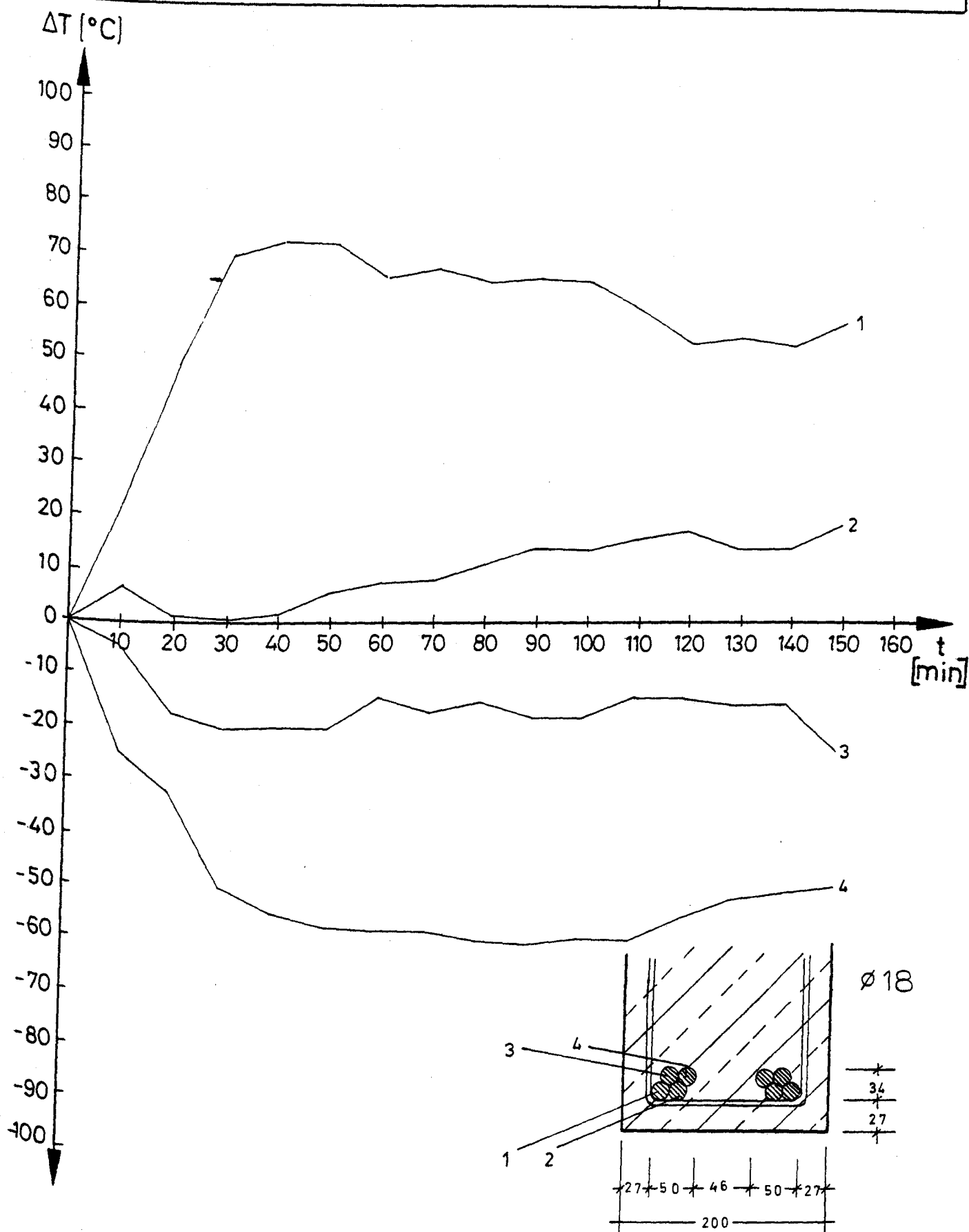
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage

1.4.2.n

# ABWEICHUNG DER STABTEMPERATUREN VON DER MITTLEREN BÜNDELTEMPERATUR

Q 53



STABBÜNDEL IM BRAND

Anlage

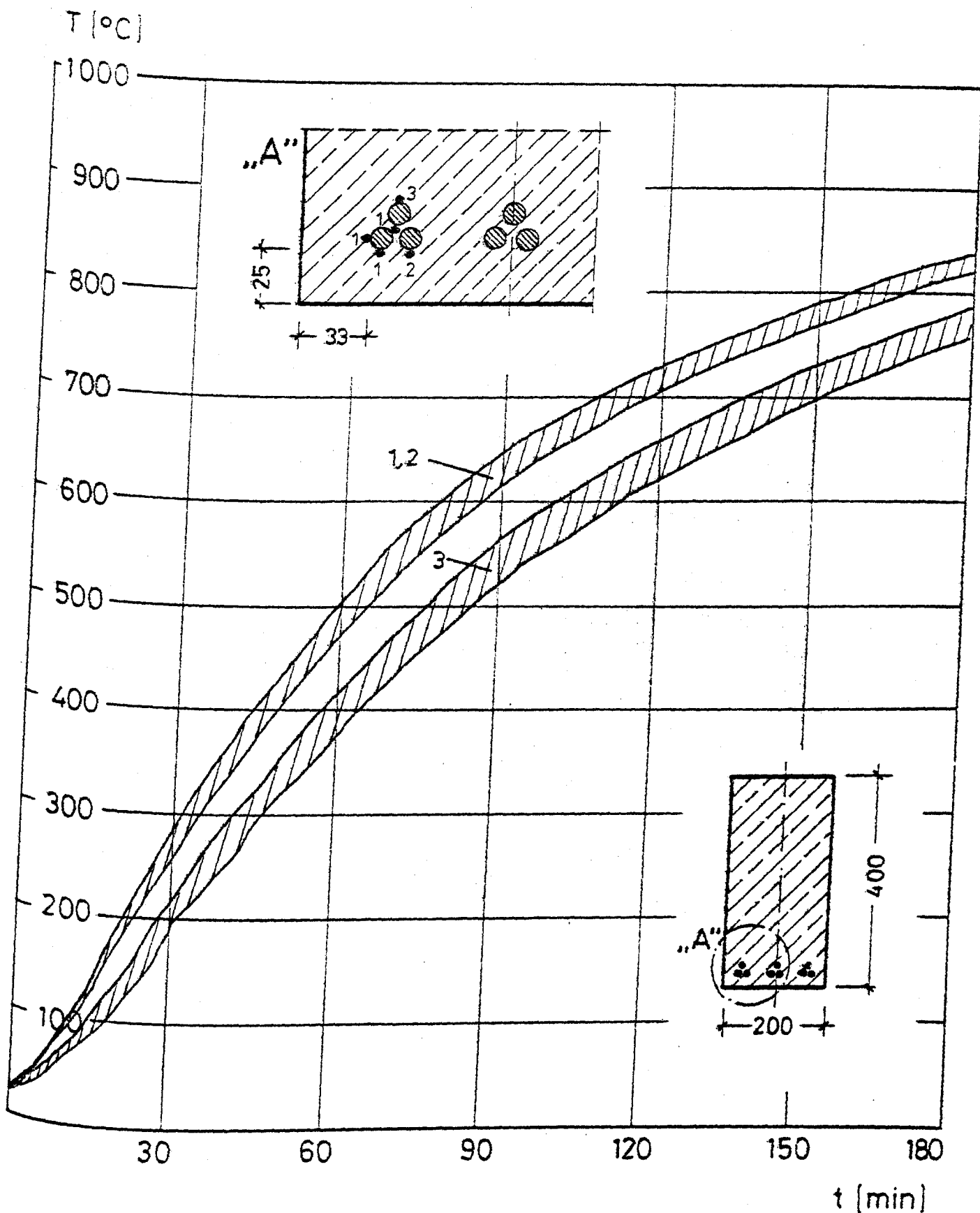
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

1.4.2.o

Technische Universität Braunschweig

# TEMPERATURVERLAUF AN DEN BÜNDELN - RECHENWERTE -

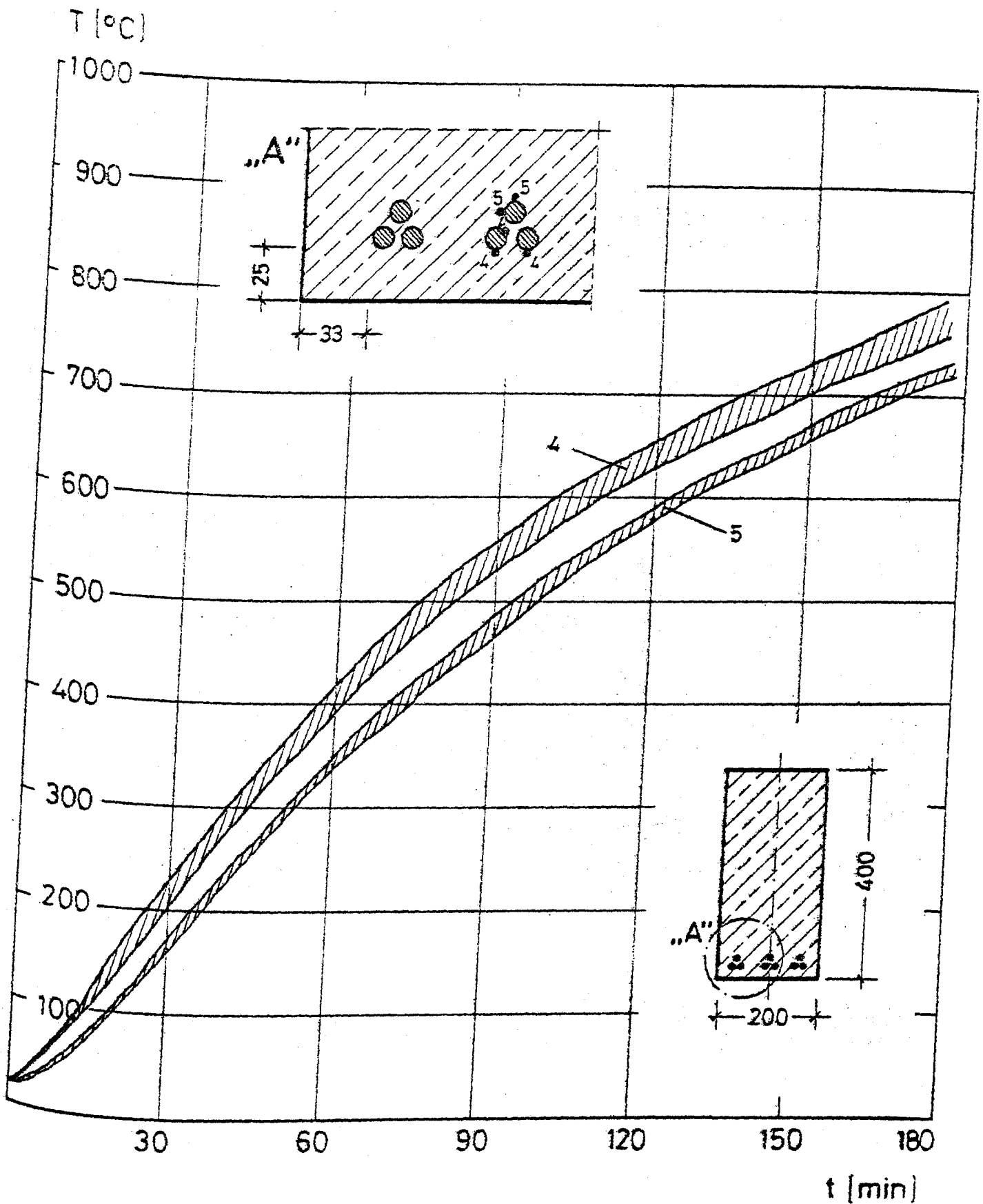
Balken 1 , Q 11  
(Q 12)



## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
1.5.a



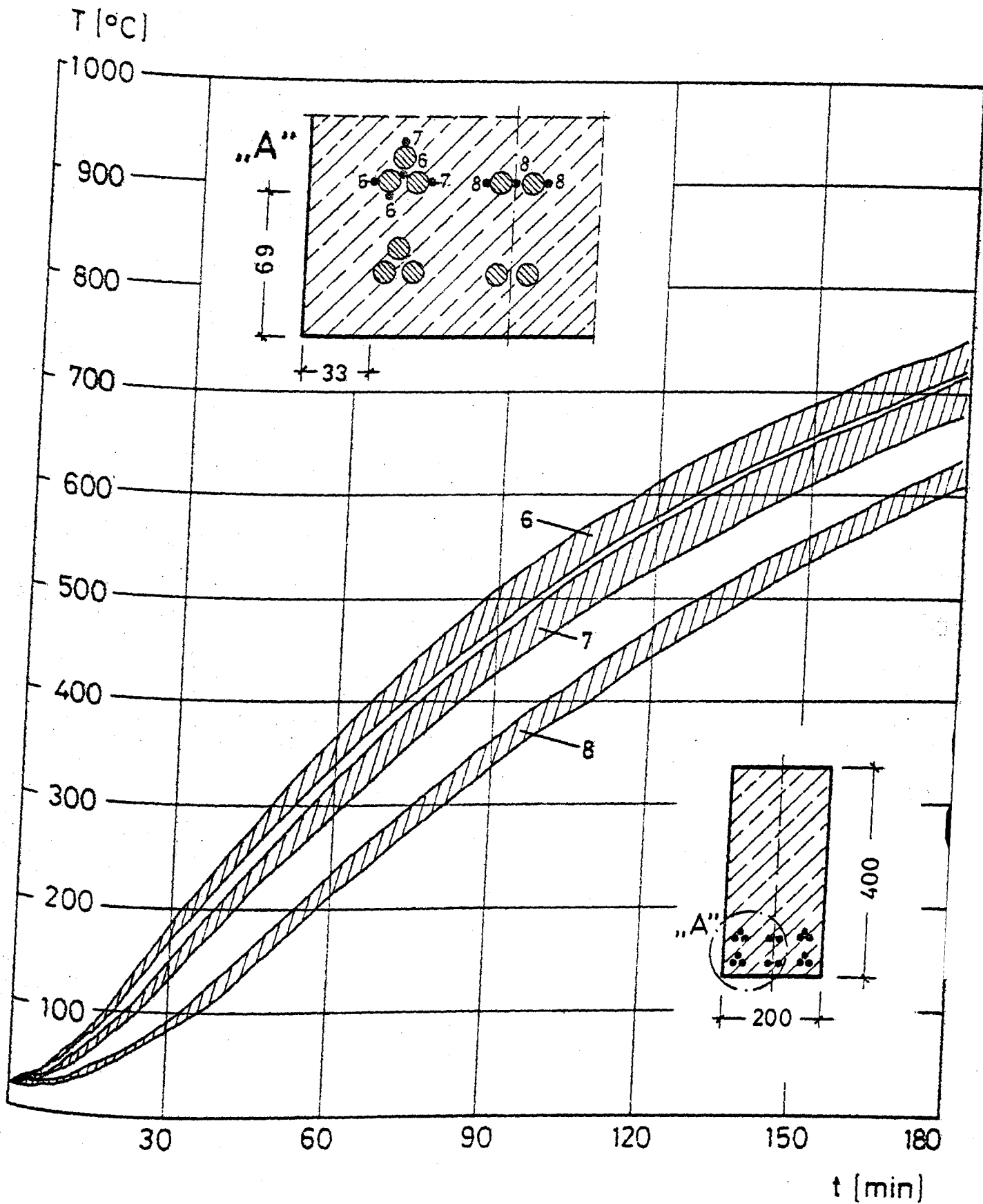
# STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
1.5.b

# TEMPERATURVERLAUF AN DEN BÜNDELN - RECHENWERTE -

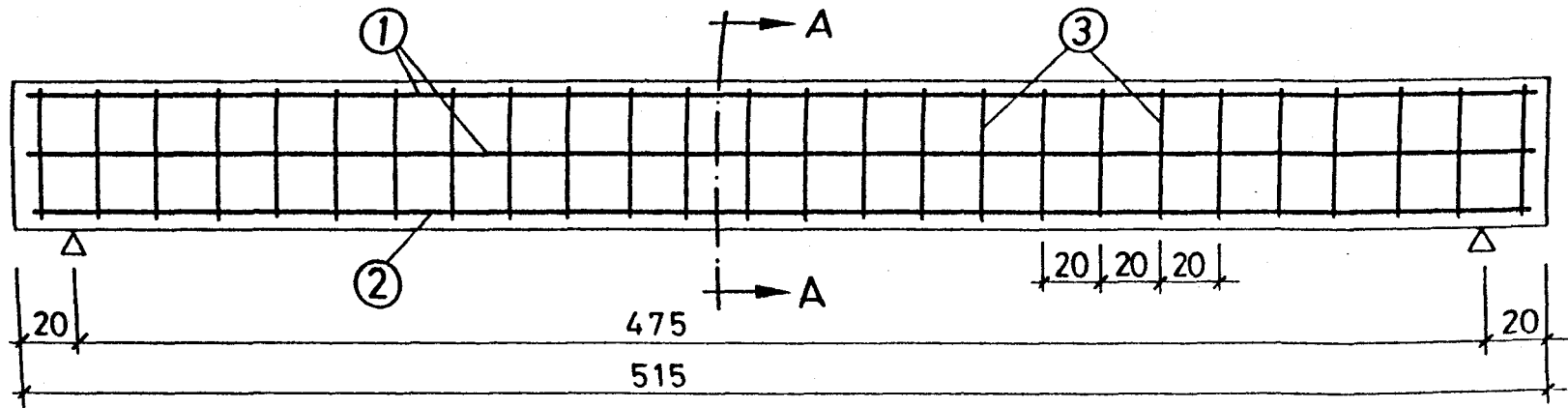
Balken 1, Q 12



## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

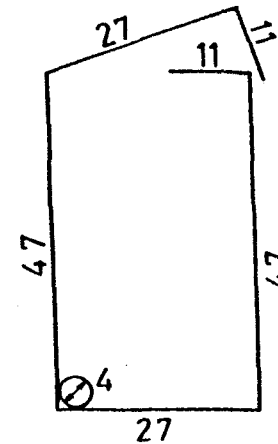
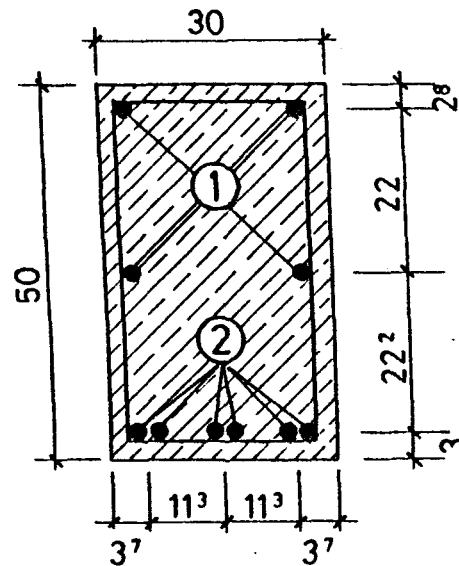
Anlage  
1.5.c



① 4 III K  $\phi 10$ , Montage  $l = 510$  cm

② 6 III K  $\phi 14$ ,  $l = 510$  cm

Schnitt A-A:

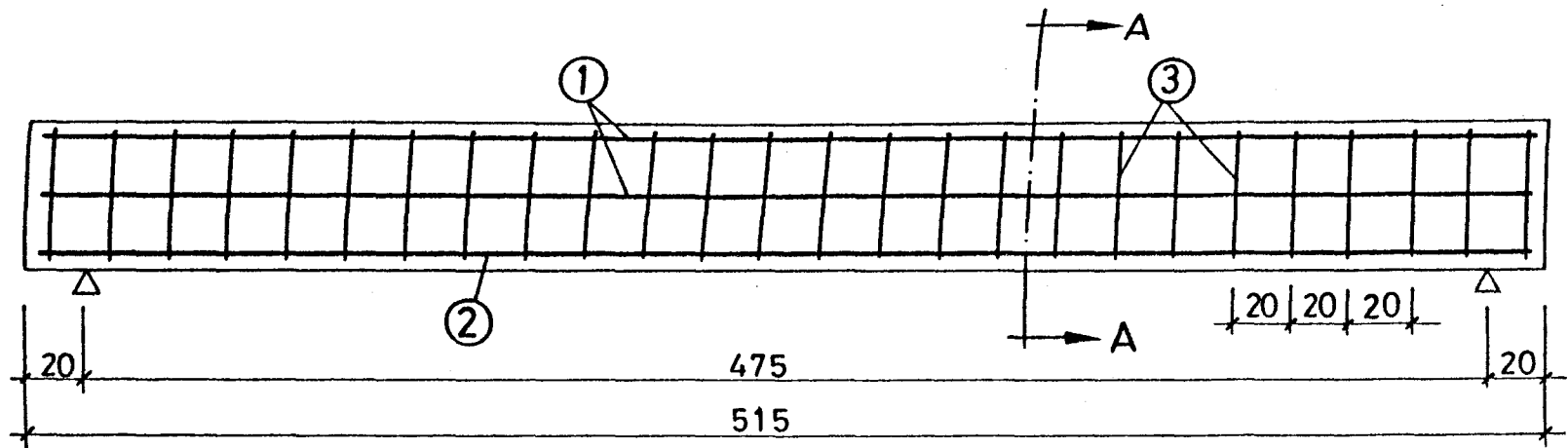


③ 26 III K  $\phi 8$ ,  
 $a \leq 20$  cm  
 $l = 170$  cm

B 25

BSt 42/50 RK

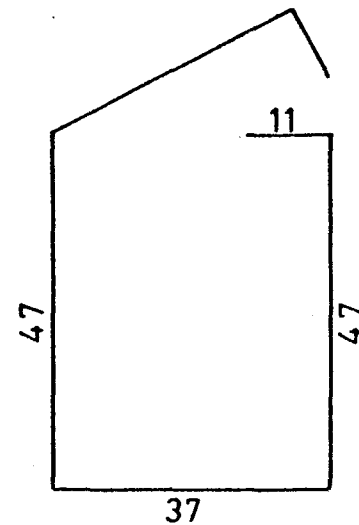
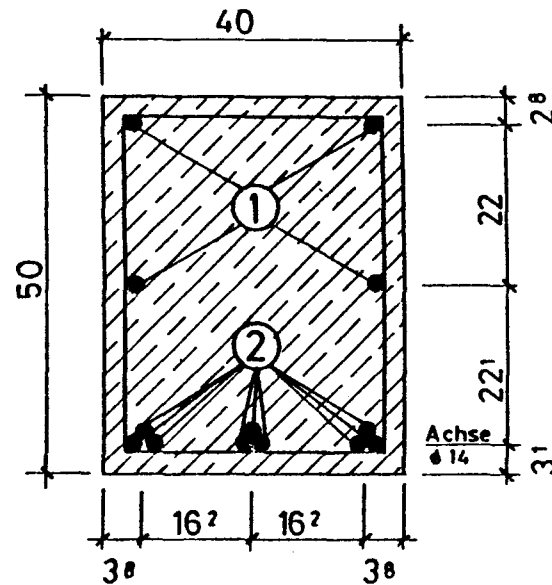
Betondeckung:  
unten = 15 mm  
seitlich = 15 mm



① 4 III K  $\phi$  10, Montage  $l = 510$  cm

② 9 III K  $\phi$  14,  $l = 510$  cm

Schnitt  
A-A



③ 26 III K  $\phi$  8,  
 $a \leq 20$  cm  
 $l = 190$  cm

B 25

BSt 42/50 RK

Betondeckung:

unten = 12 mm

seitlich = 16 mm

STABBÜNDEL IM BRAND

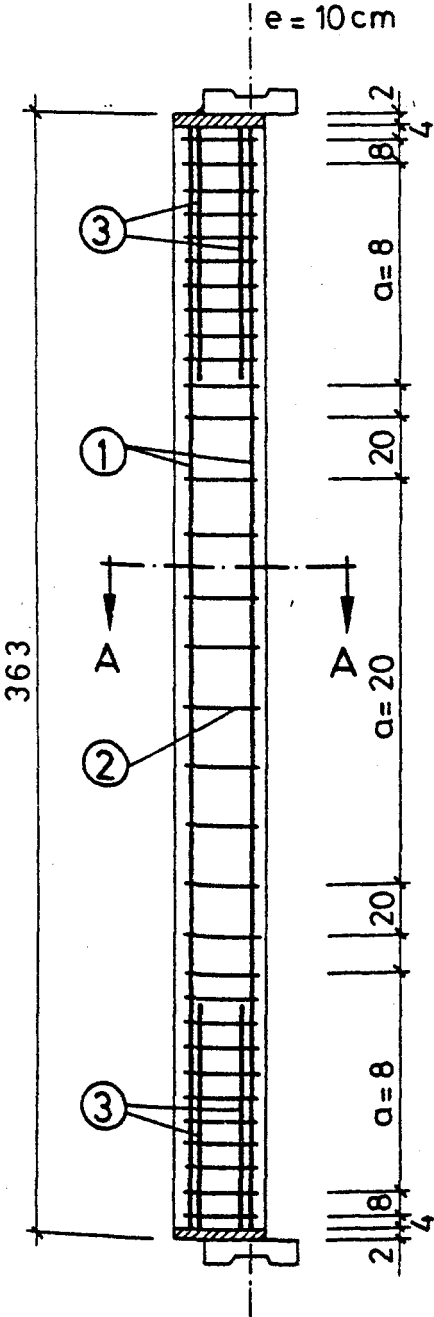
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

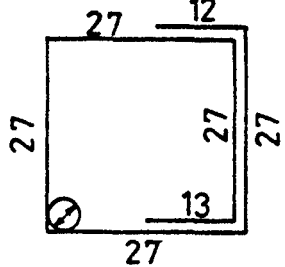
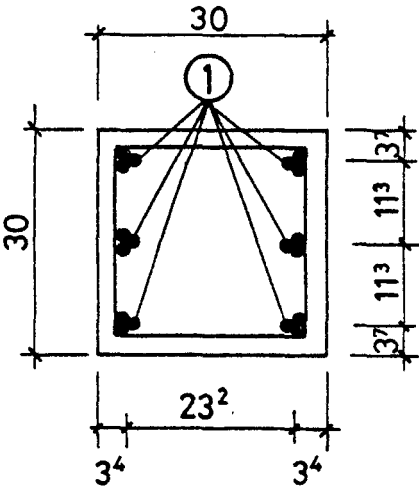
2.1-2





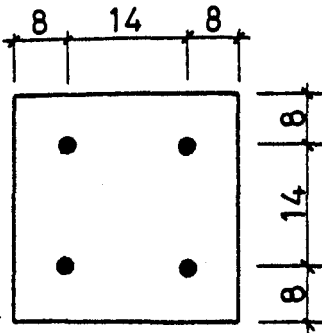
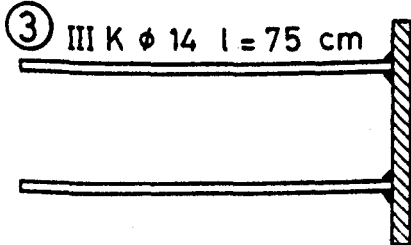
① 18 III K  $\phi 14$   $l = 357$

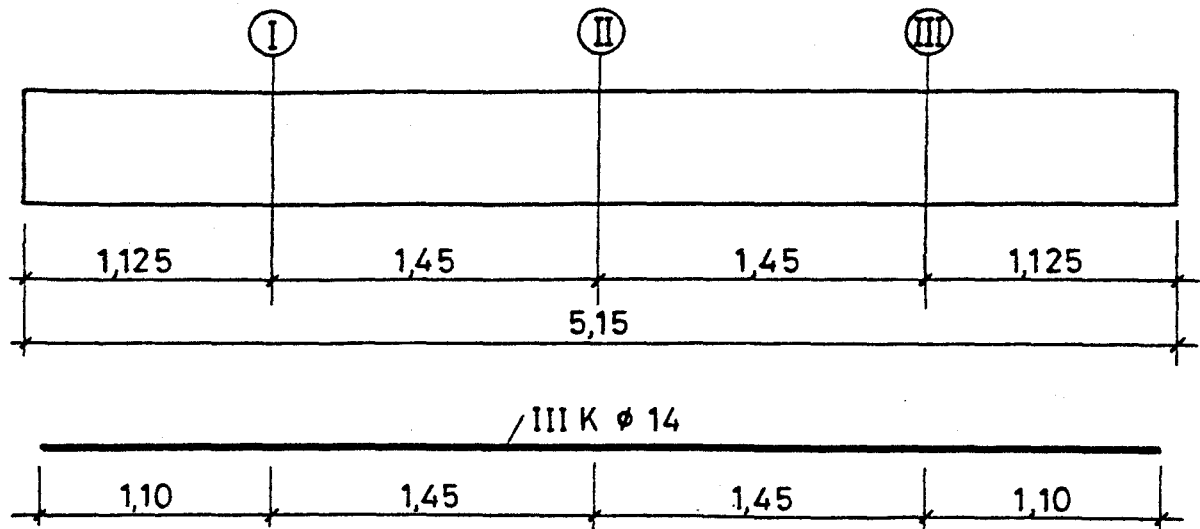
Schnitt A-A



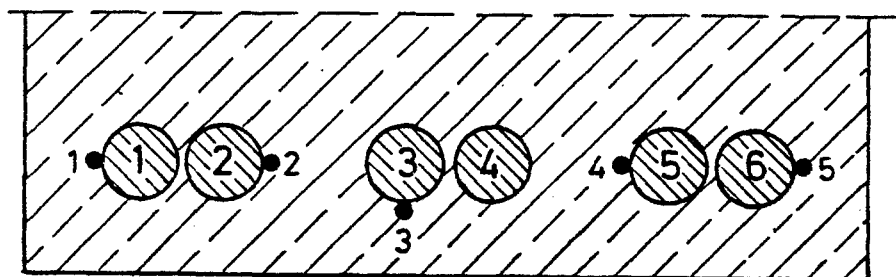
② 32 III K  $\phi 8$ ,  $l = 160$  cm

Baustoffe: B 25  
BSt 42 / 50 RK  
Betondeckung = 15 mm

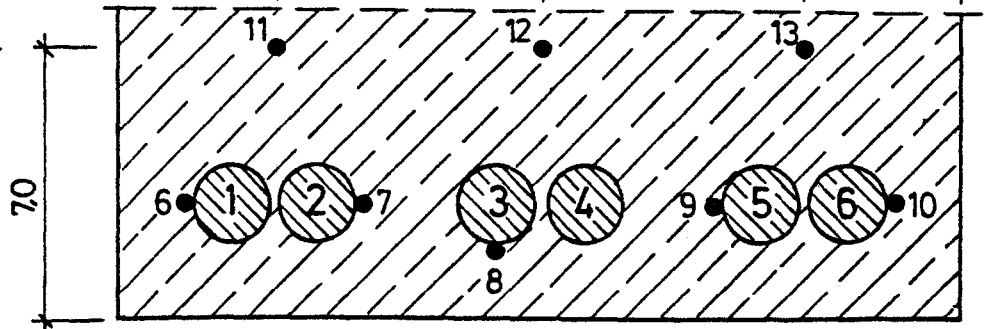




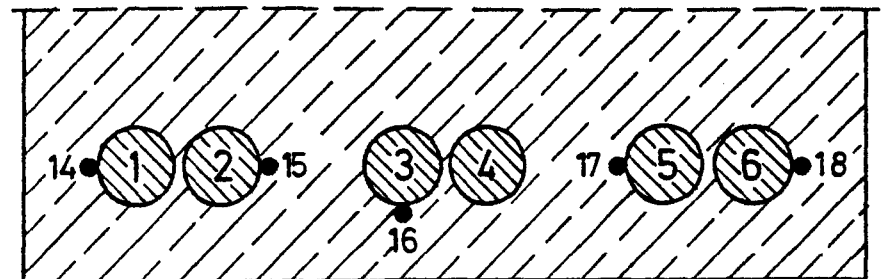
Schnitt I:

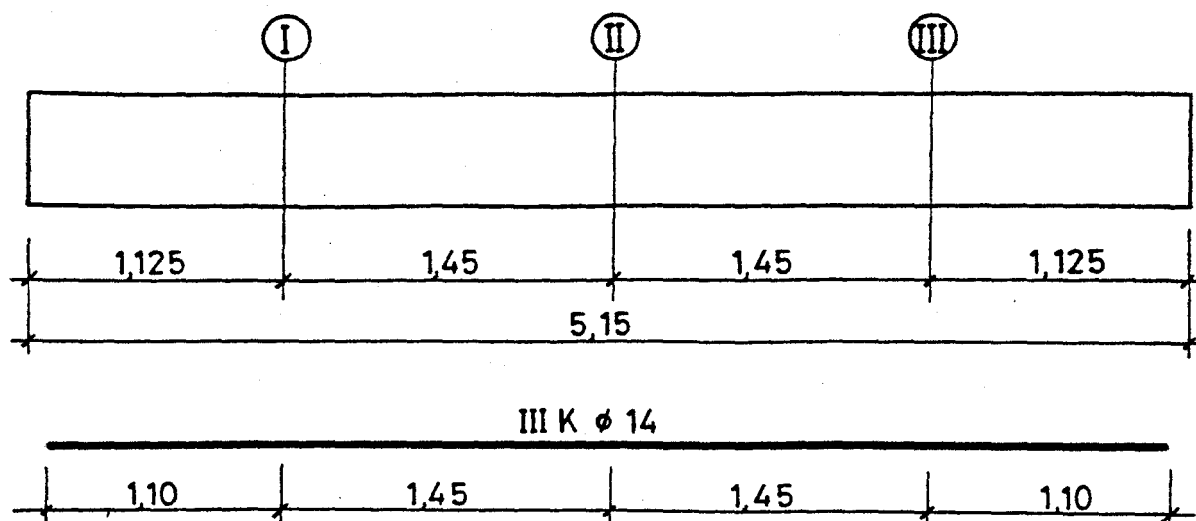


Schnitt II:

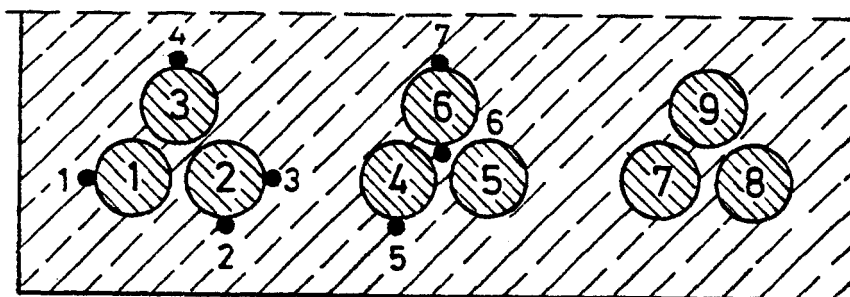


Schnitt III:

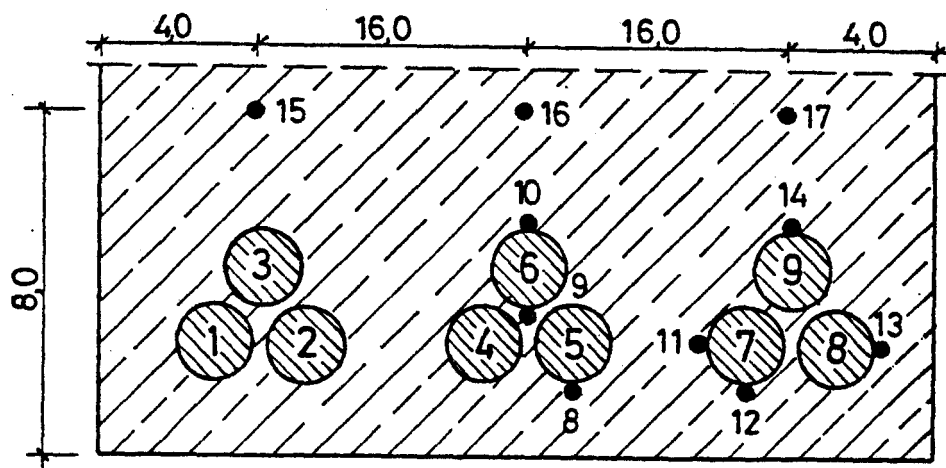




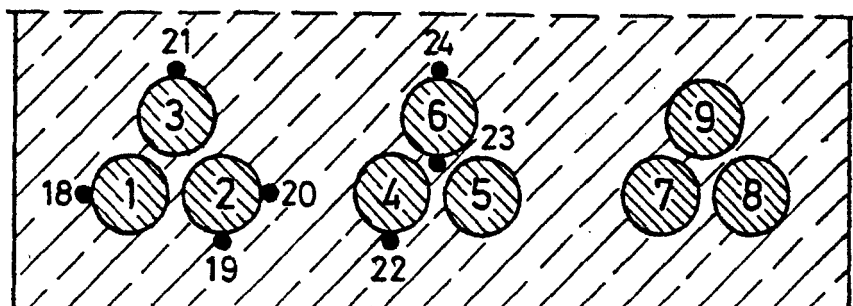
Schnitt I :

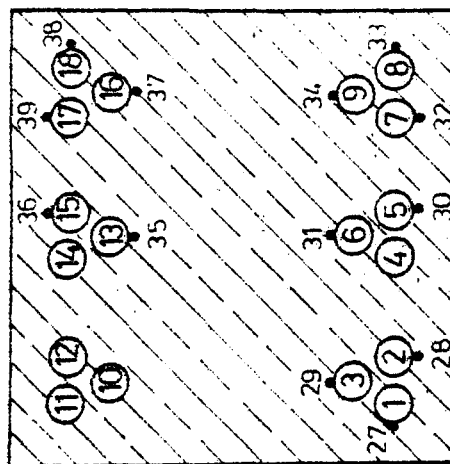
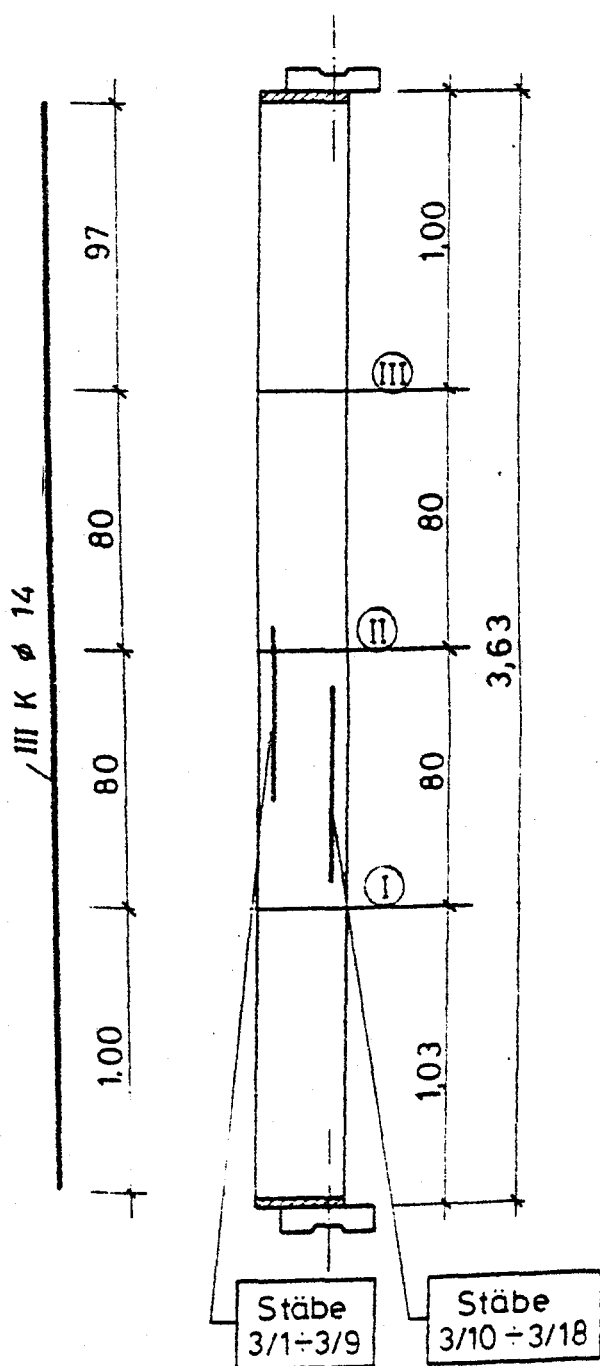


Schnitt II :

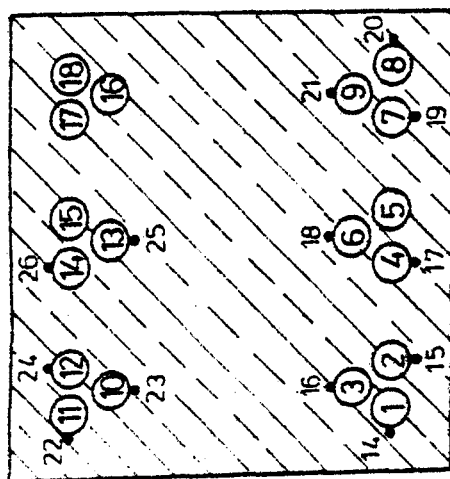


Schnitt III :

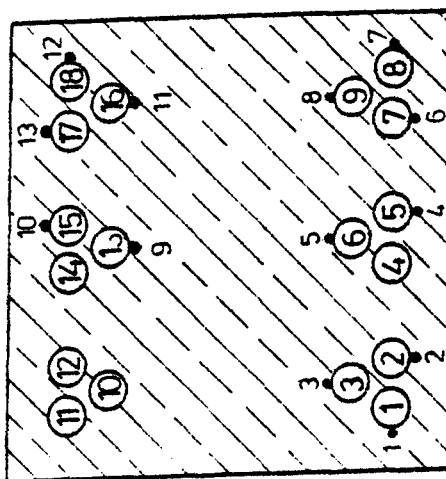




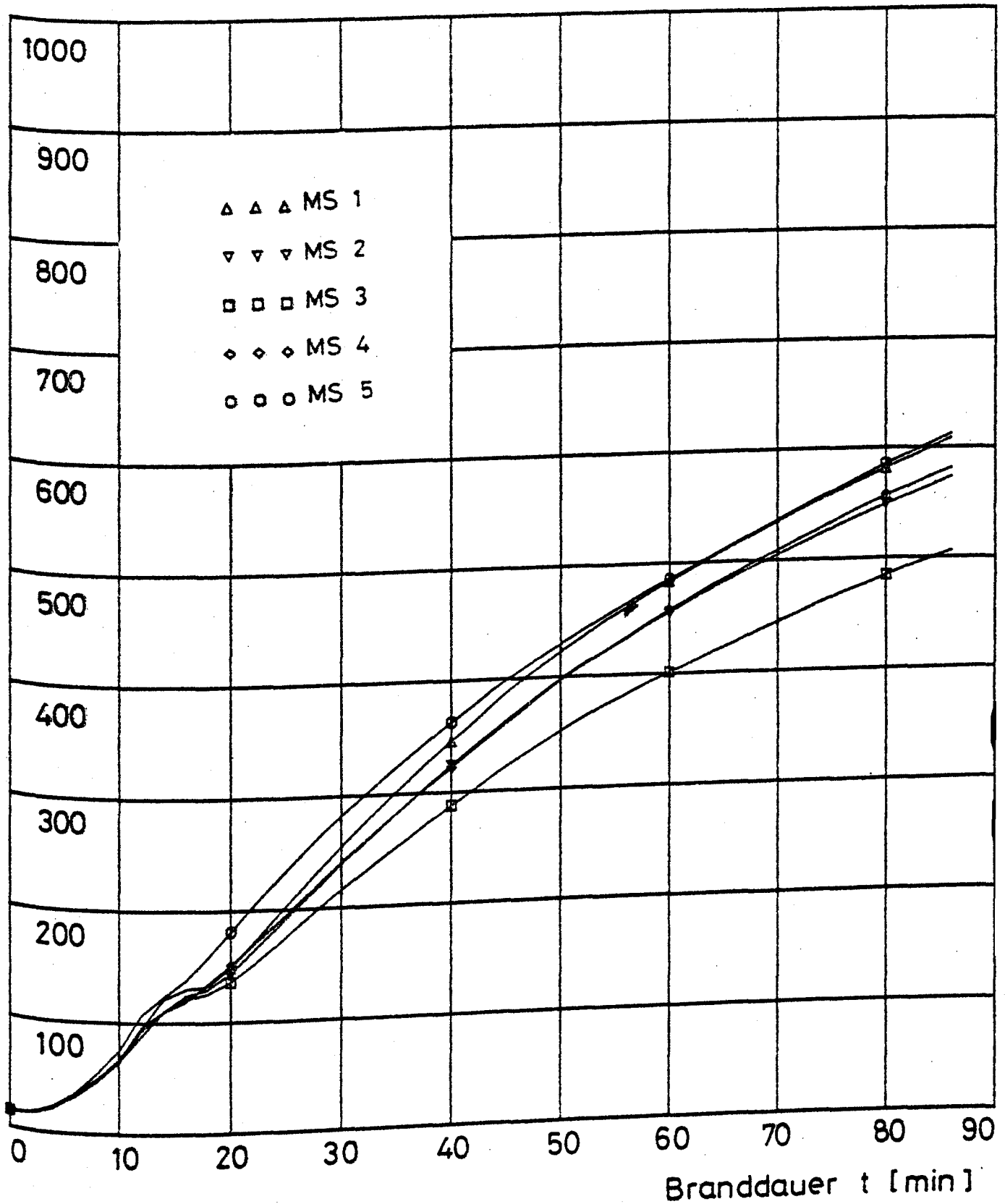
Schnitt III



Schnitt II



Schnitt I

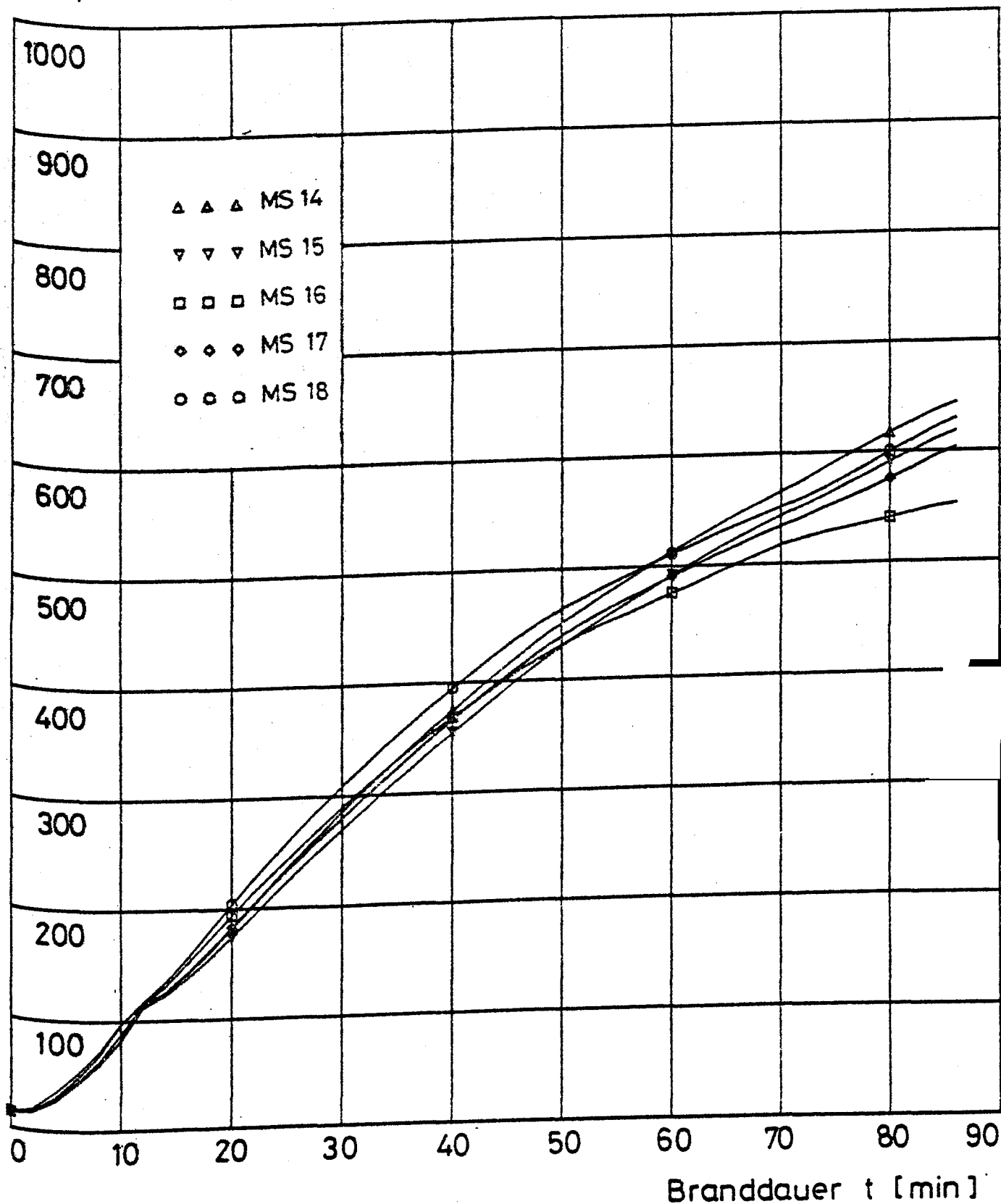
Temperatur  $T$  [°C]


## STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

 Anlage  
2.3.2a

Temperatur T [°C]

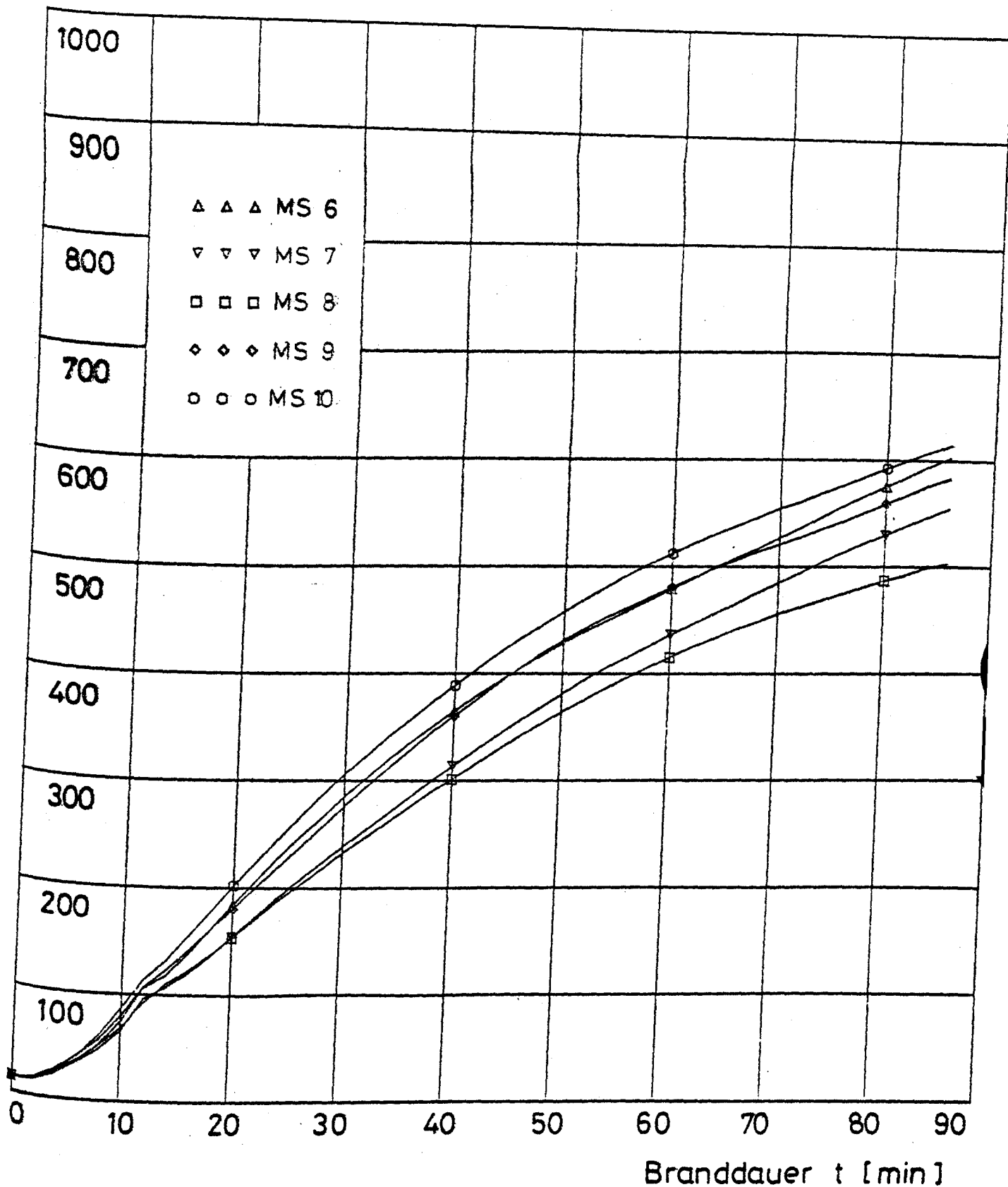


STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Anlage  
2.3.2.b

Temperatur  $T$  [°C]



STABBÜNDEL IM BRAND

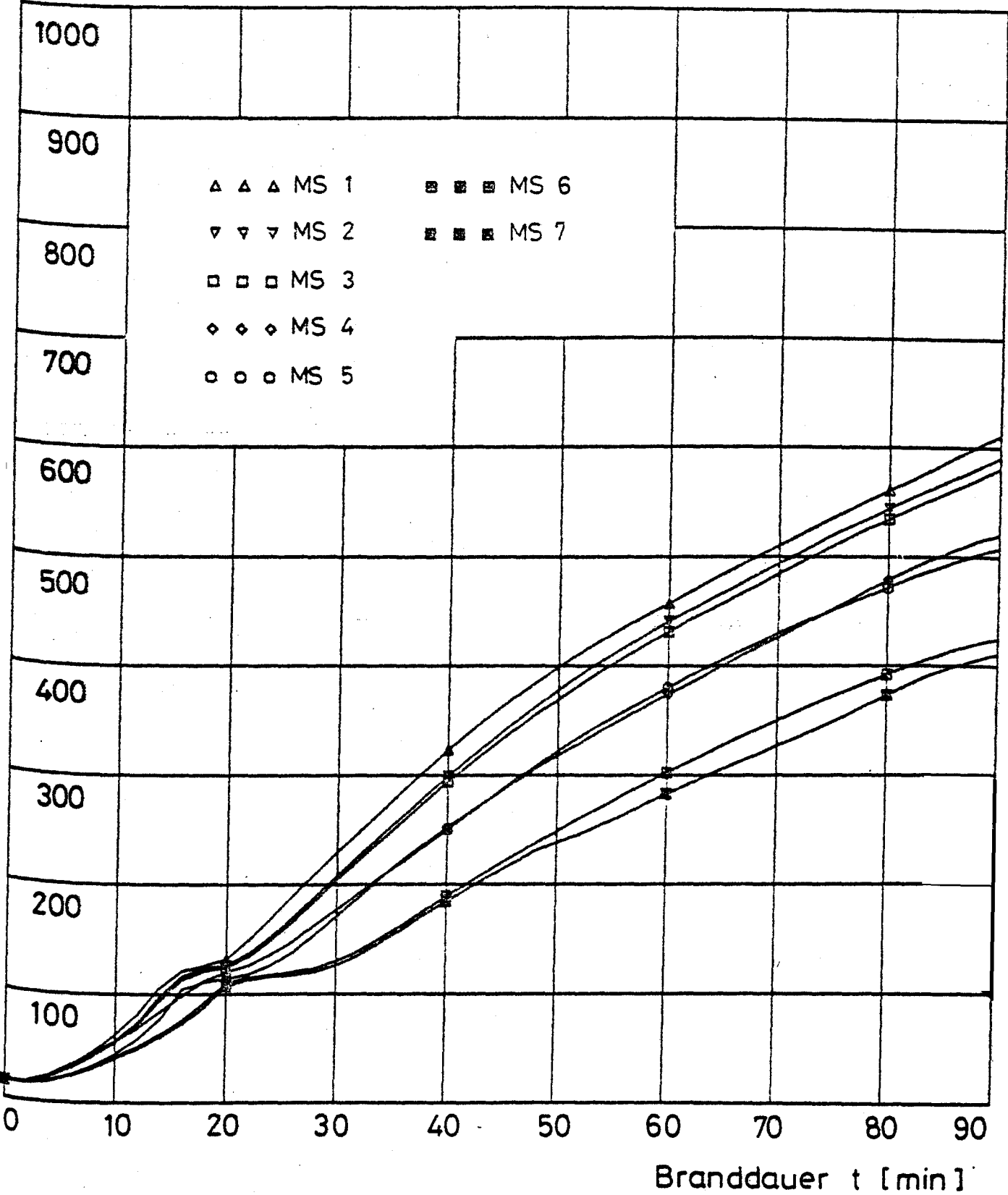
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

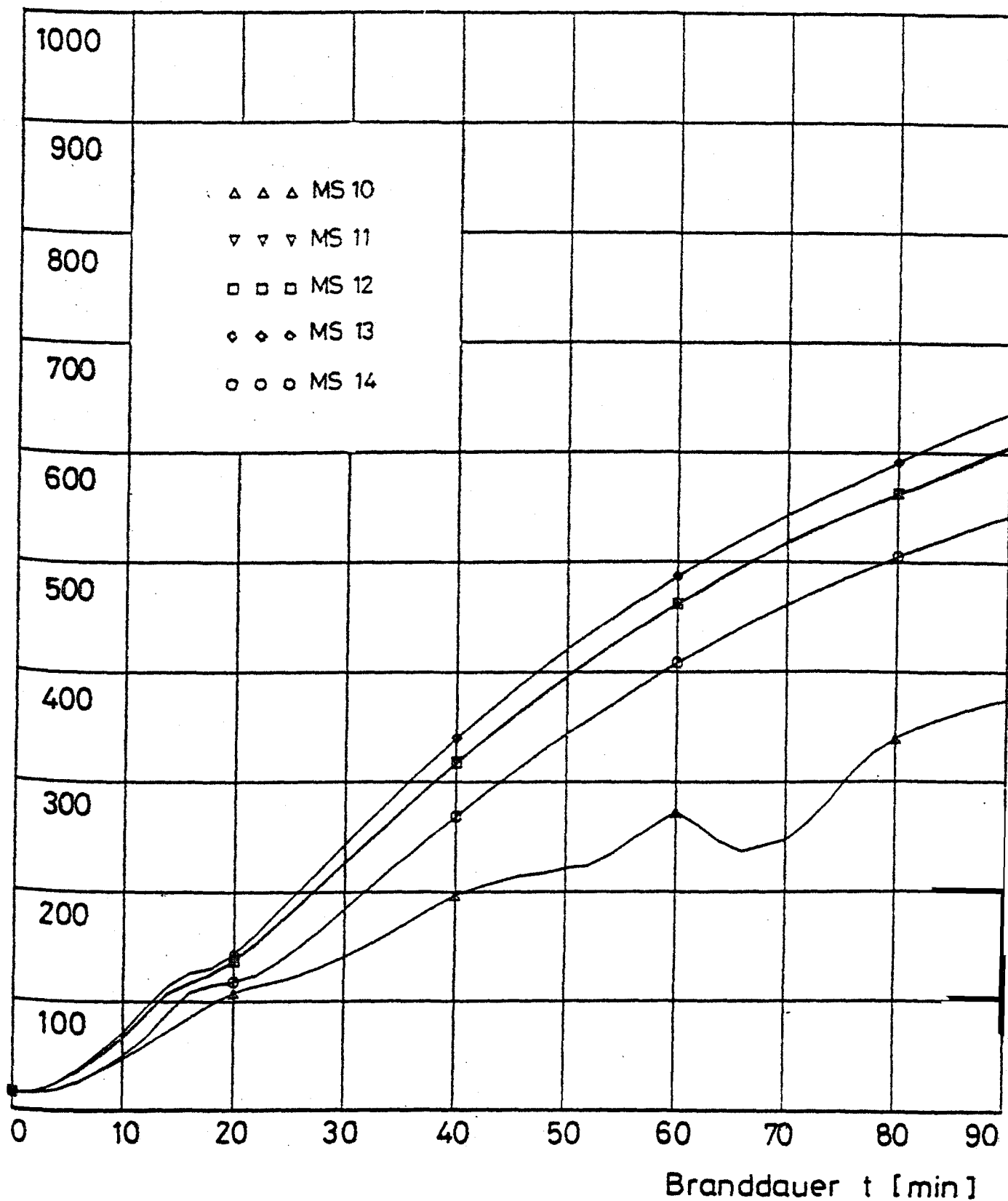
Anlage

2.3.2.c

Temperatur T [°C]





Temperatur  $T$  [°C]


## STABBÜNDEL IM BRAND

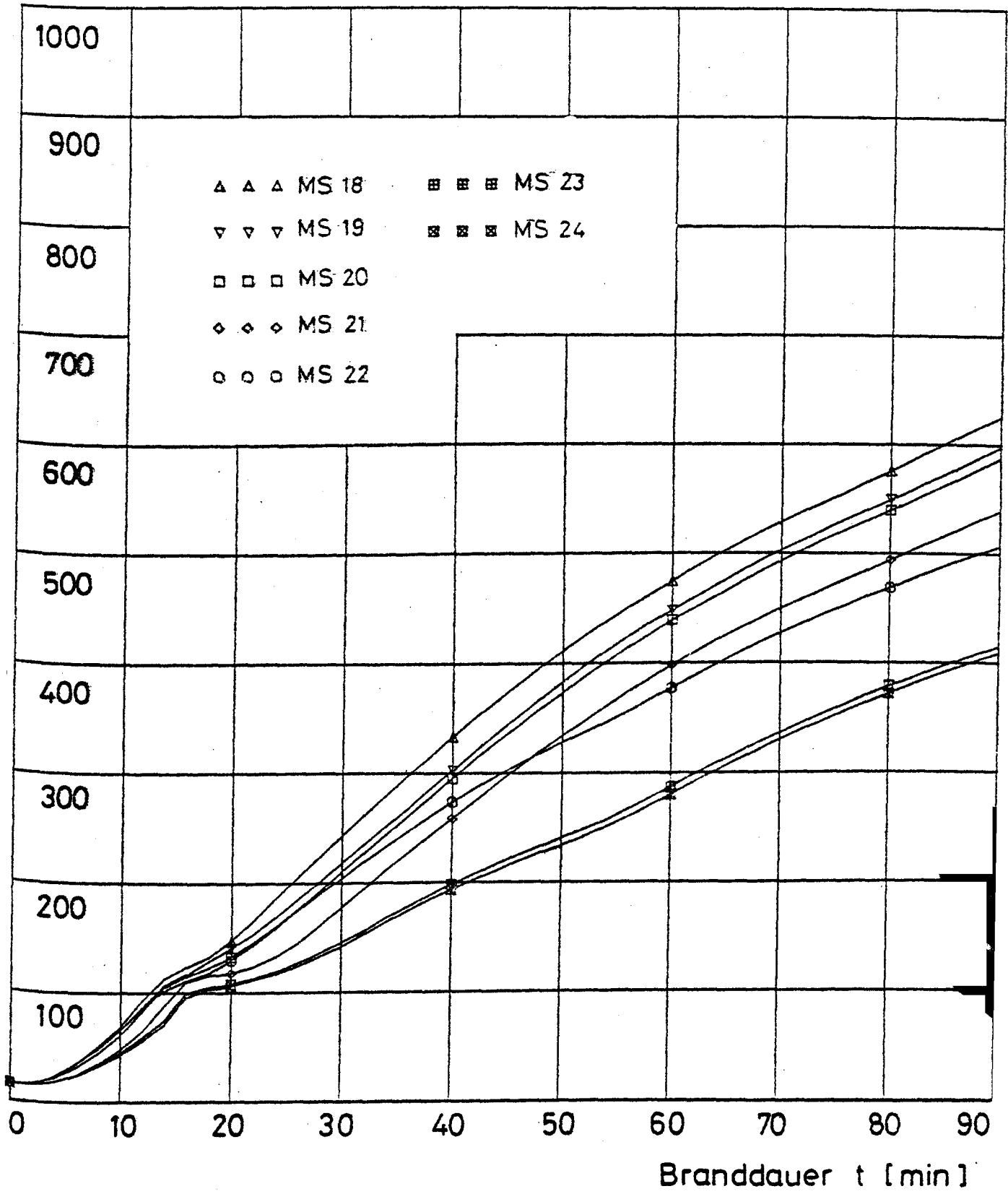
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

2.3.2.e

Temperatur T [°C]

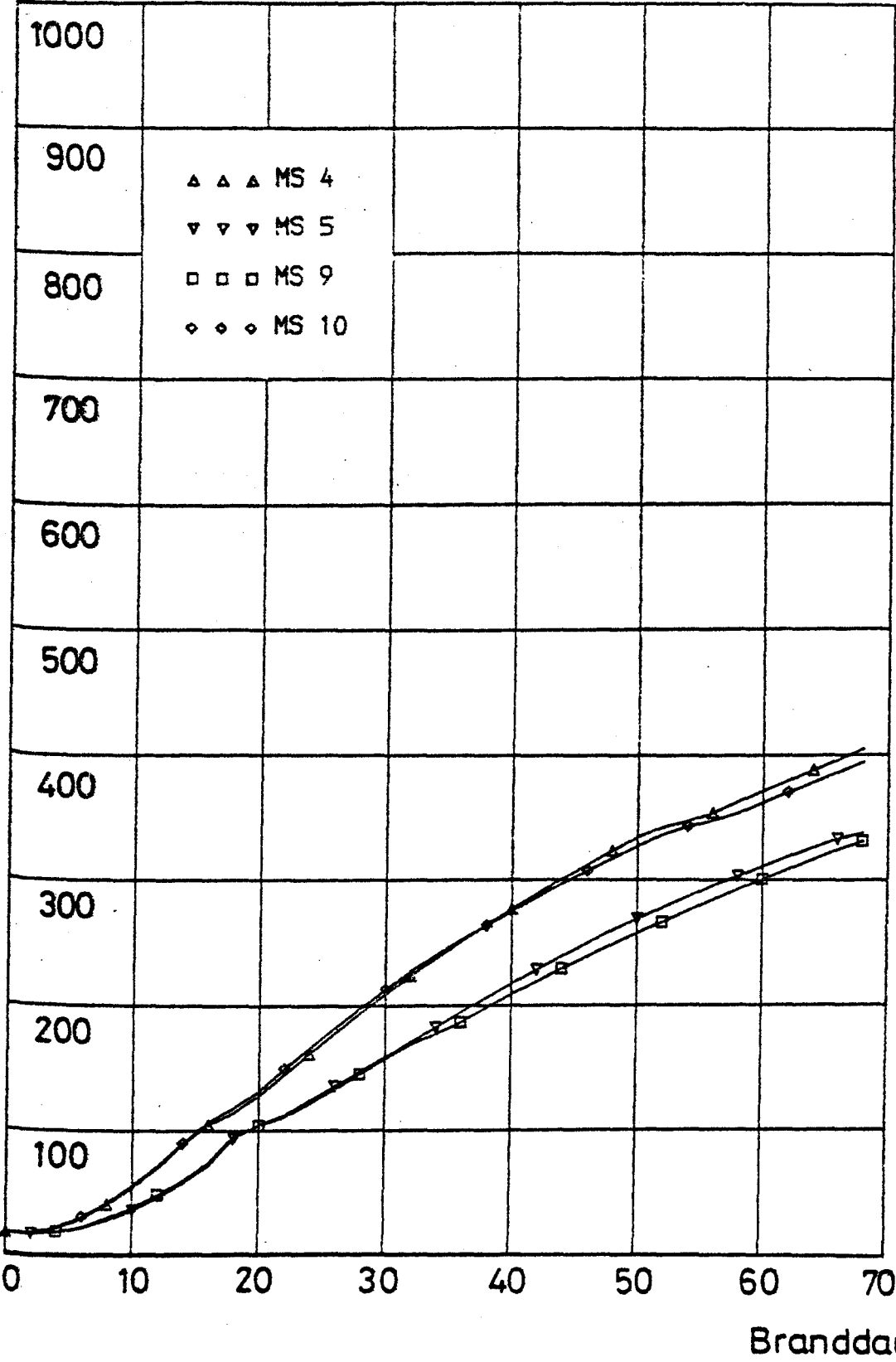


STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
2.3.2.f

Temperatur T [°C]

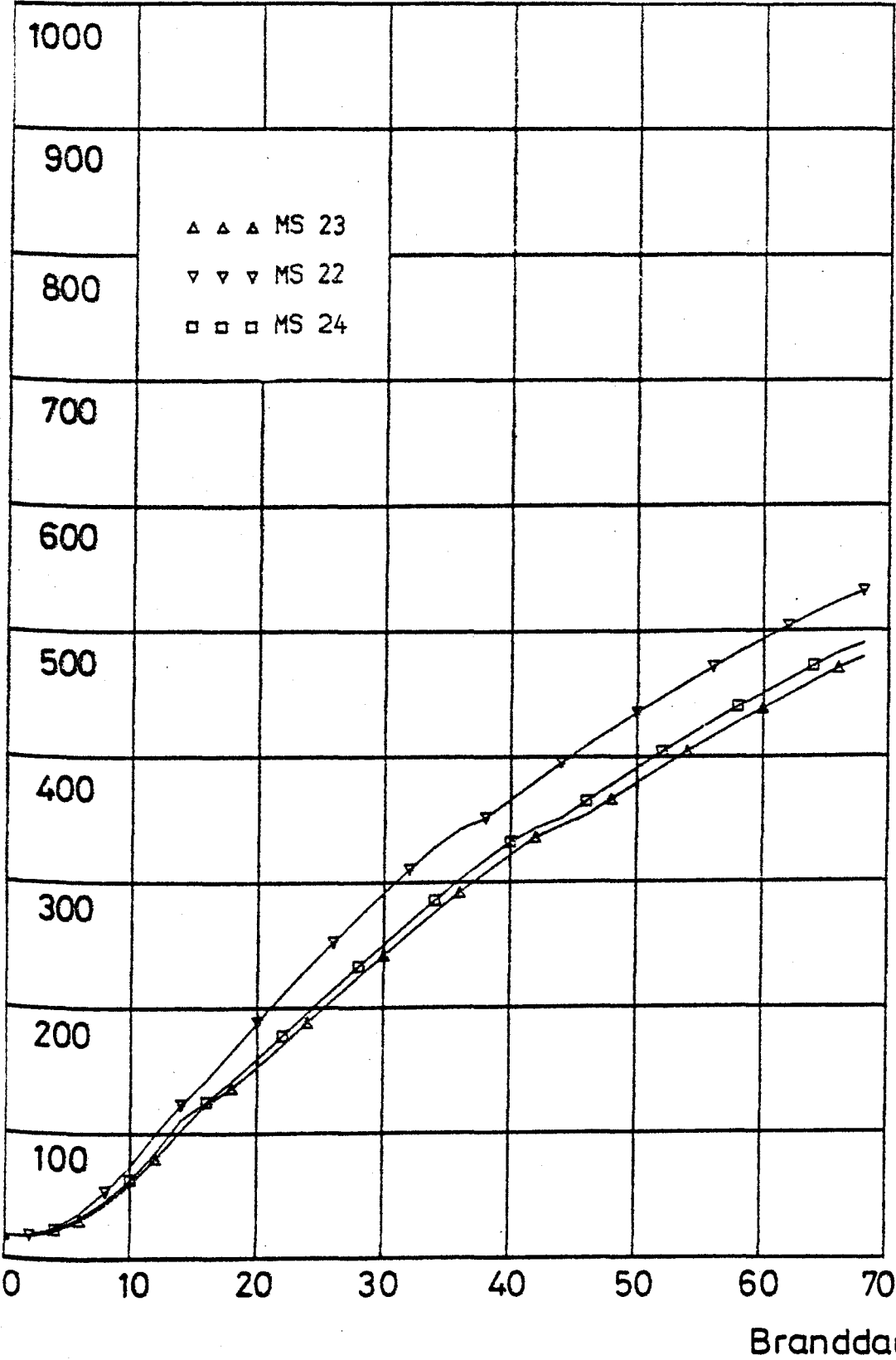


STABBÜNDEL IM BRAND

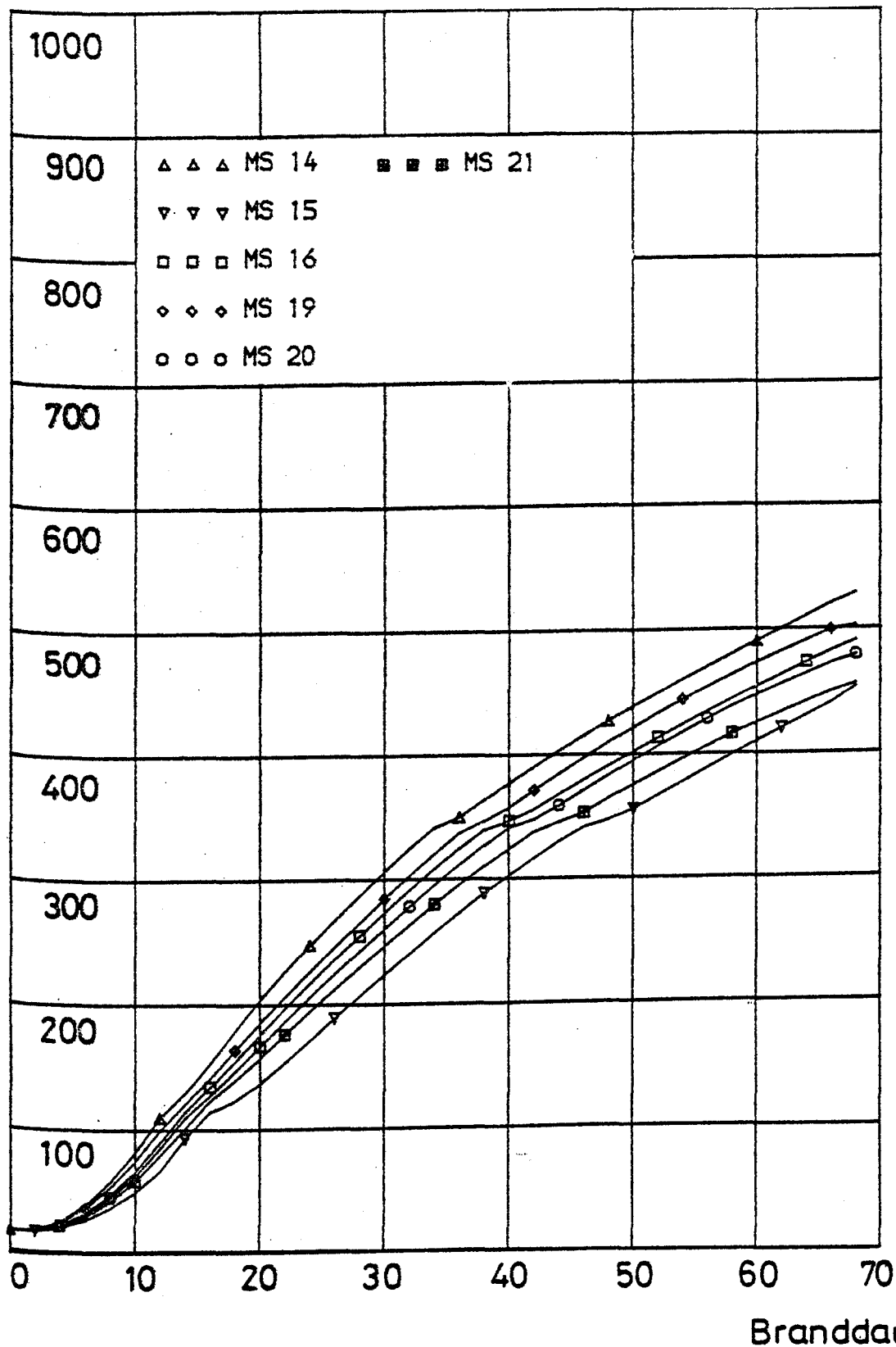
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
2.3.2.g

Temperatur T [°C]



Temperatur T [°C]



STABBÜNDEL IM BRAND

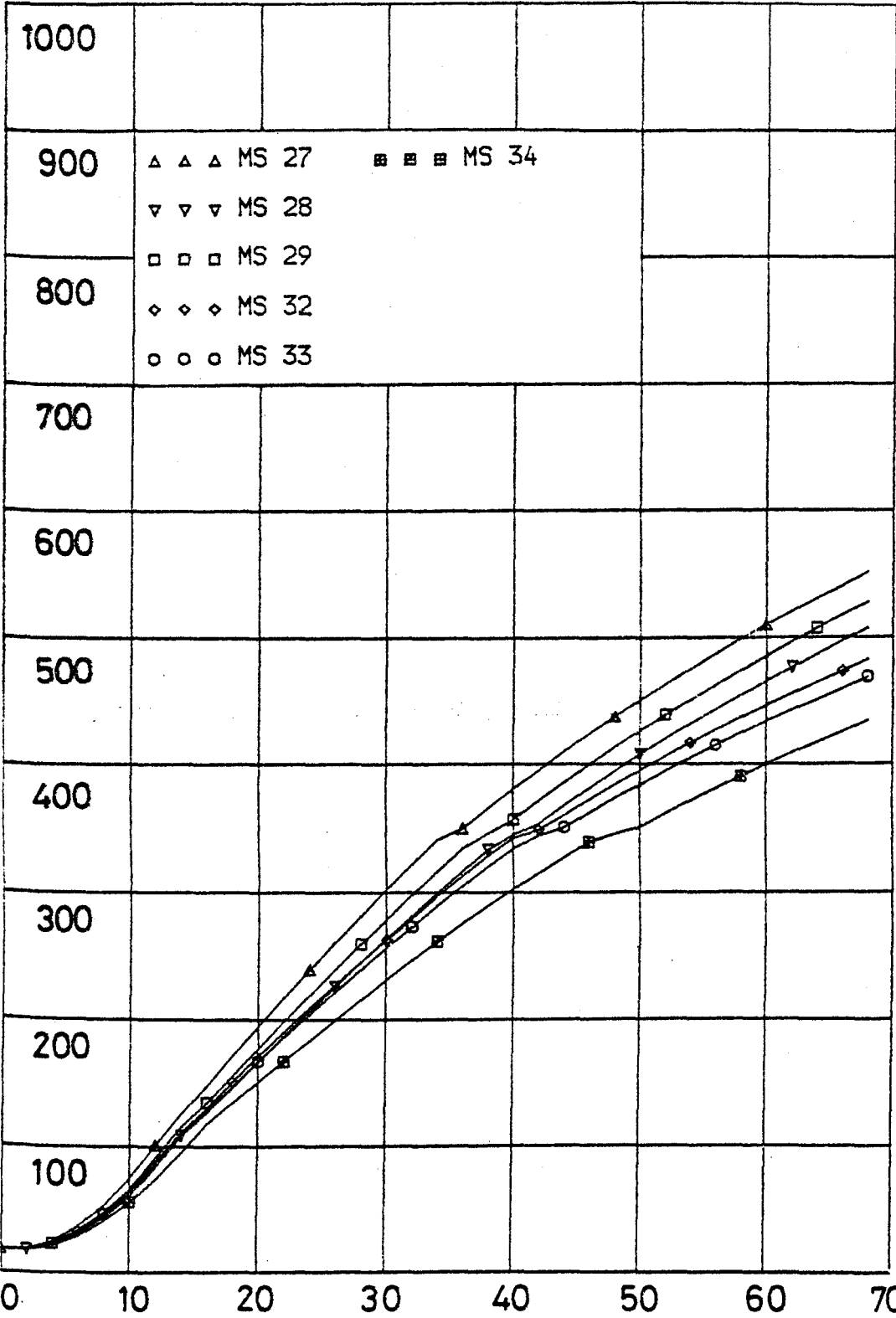
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

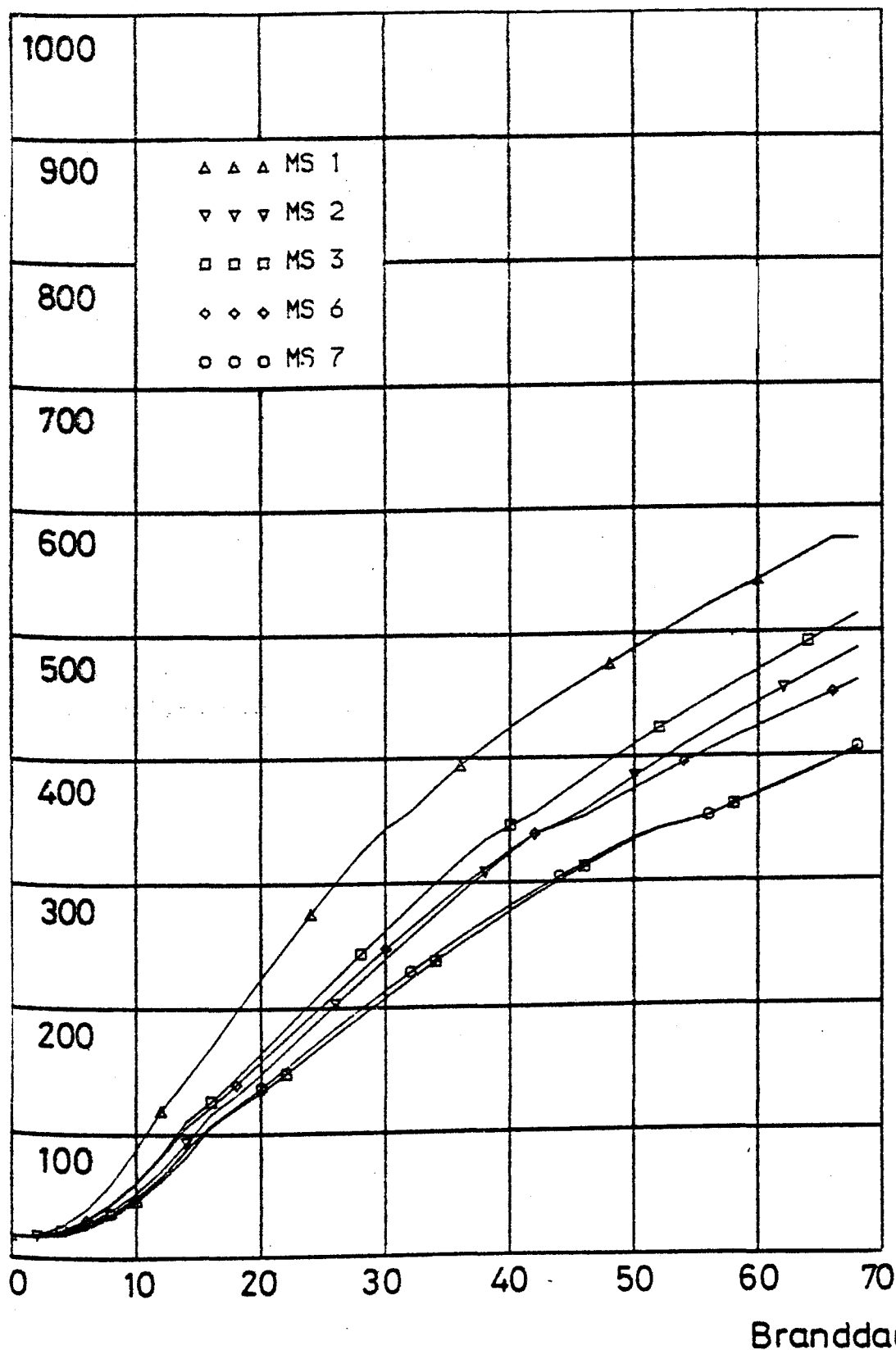
2.3.2.i

Temperatur T [°C]



Branddauer t [min]

Temperatur T [°C]



## STABBÜNDEL IM BRAND

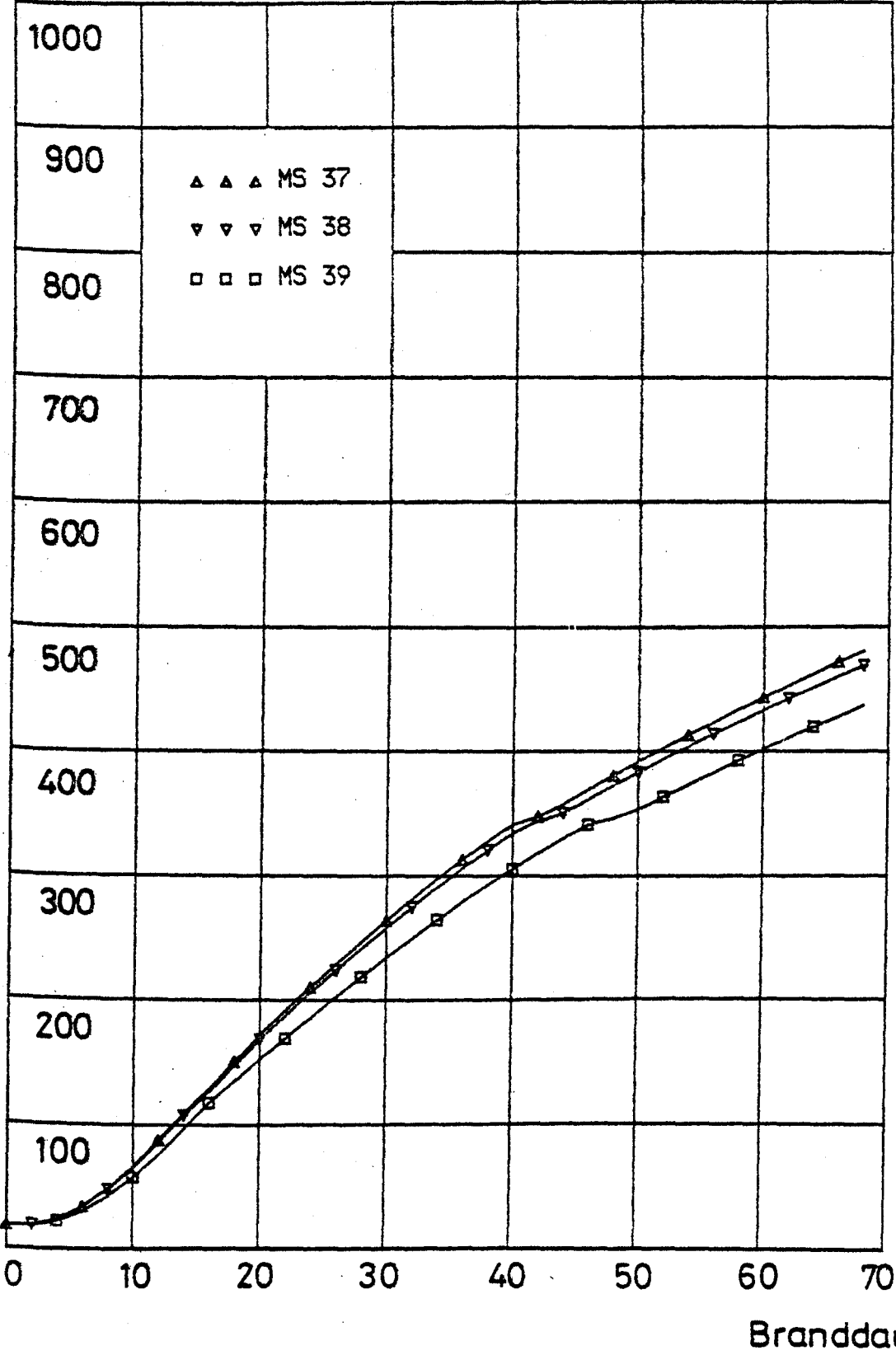
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

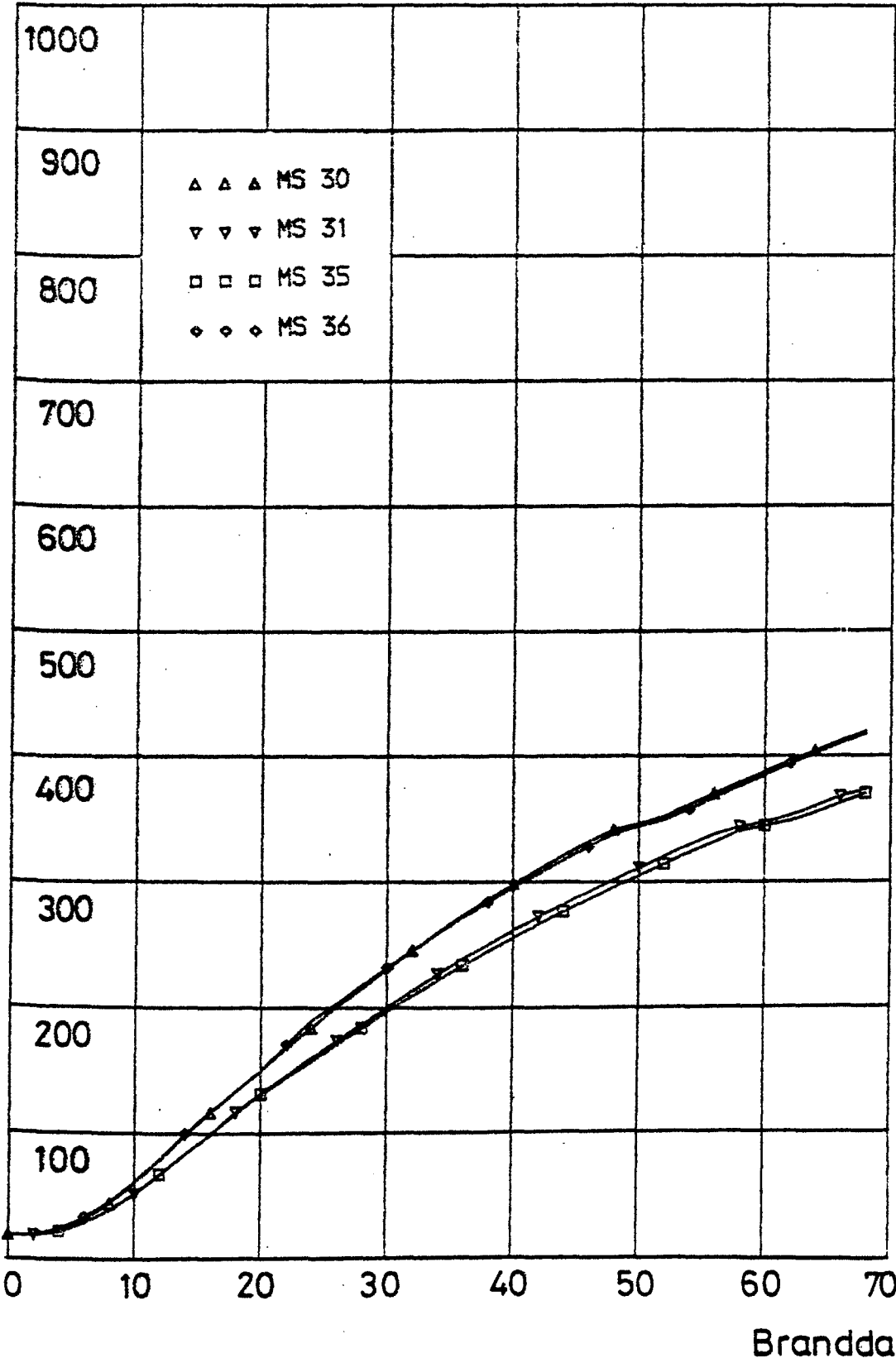
2.3.2.k

Temperatur T [°C]





Temperatur T [°C]

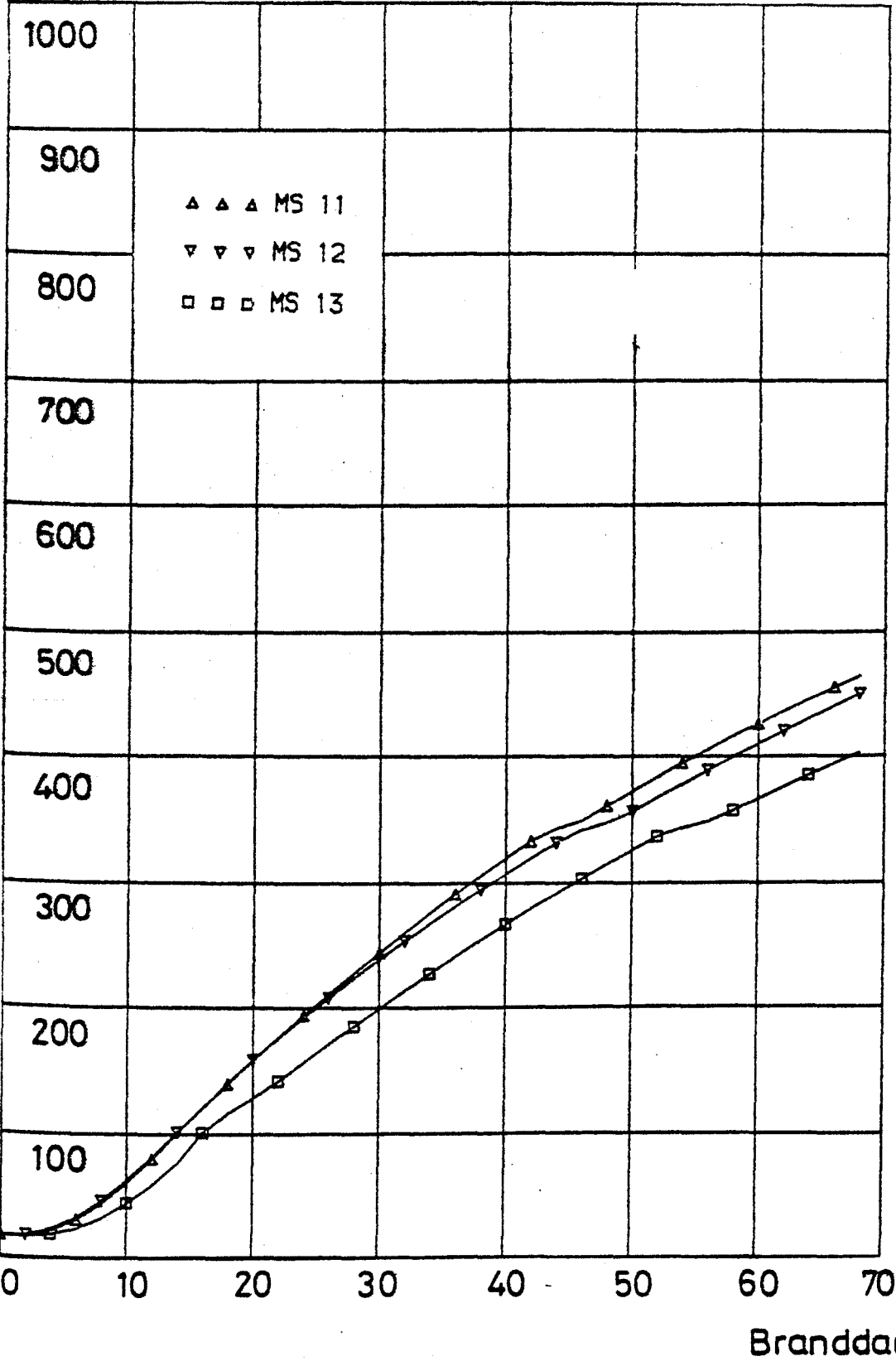


STABBÜNDEL IM BRAND

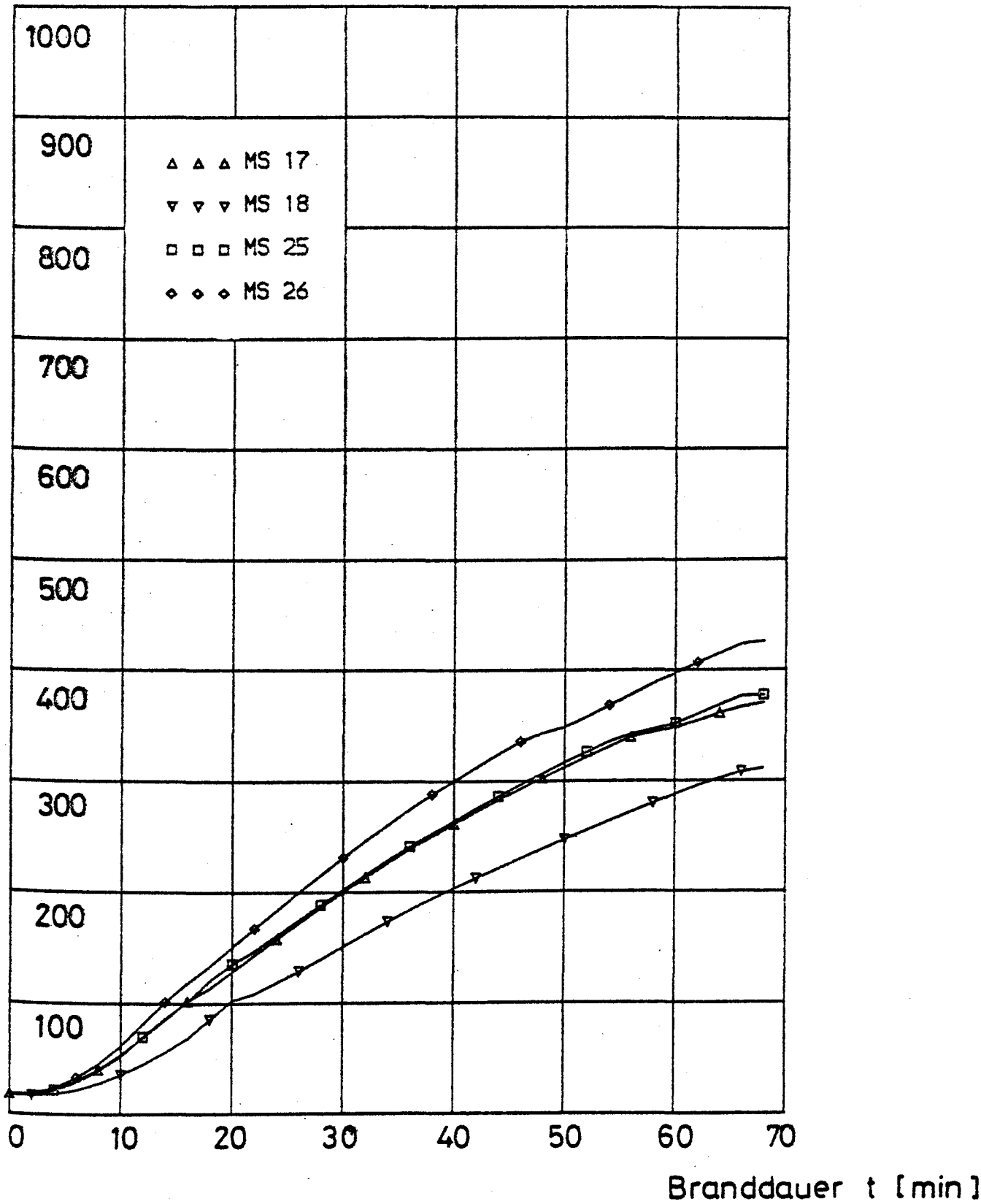
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

Anlage  
2.3.2.m

Temperatur T [°C]



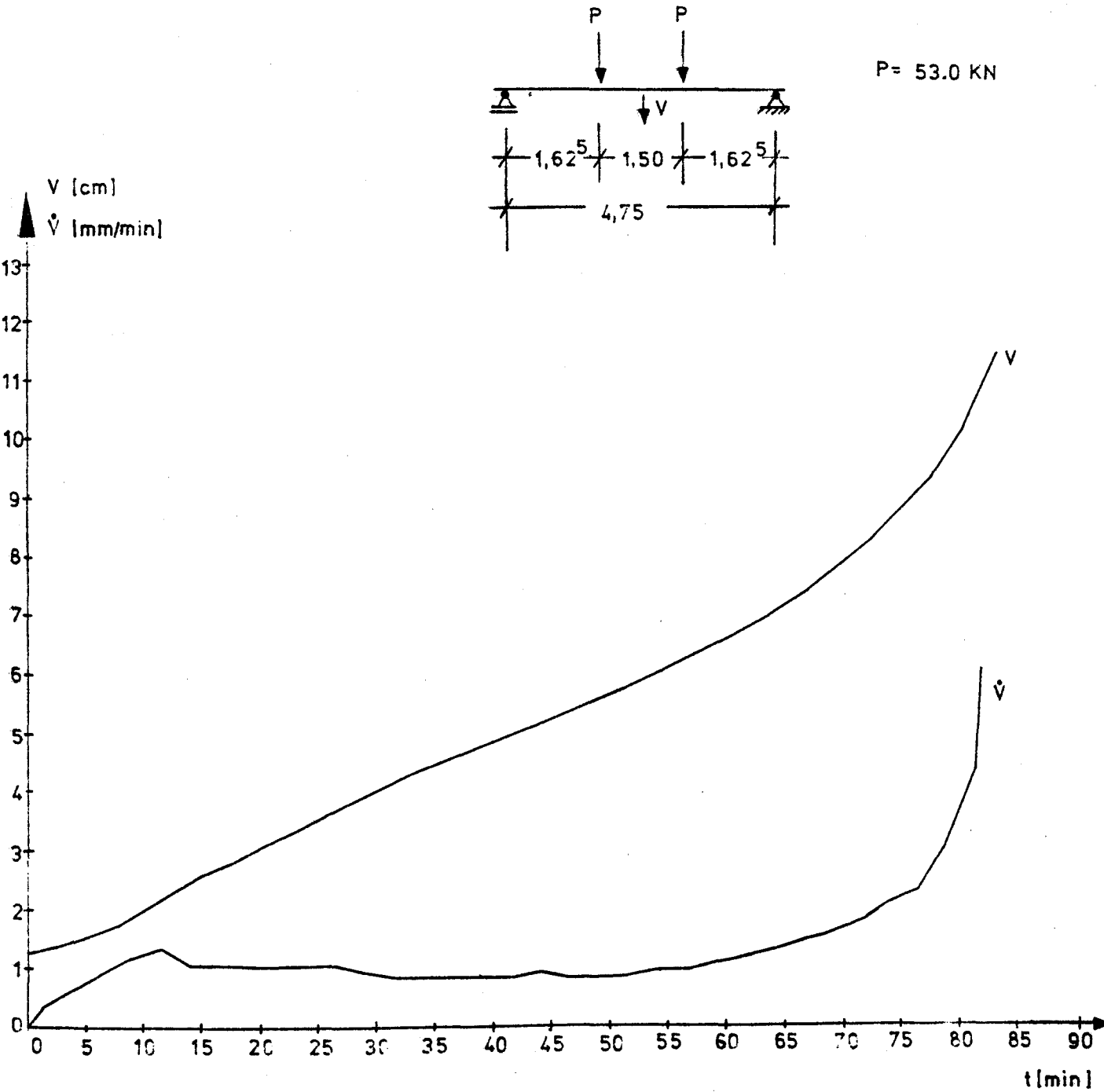
Temperatur T [°C]



STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Technische Universität Braunschweig

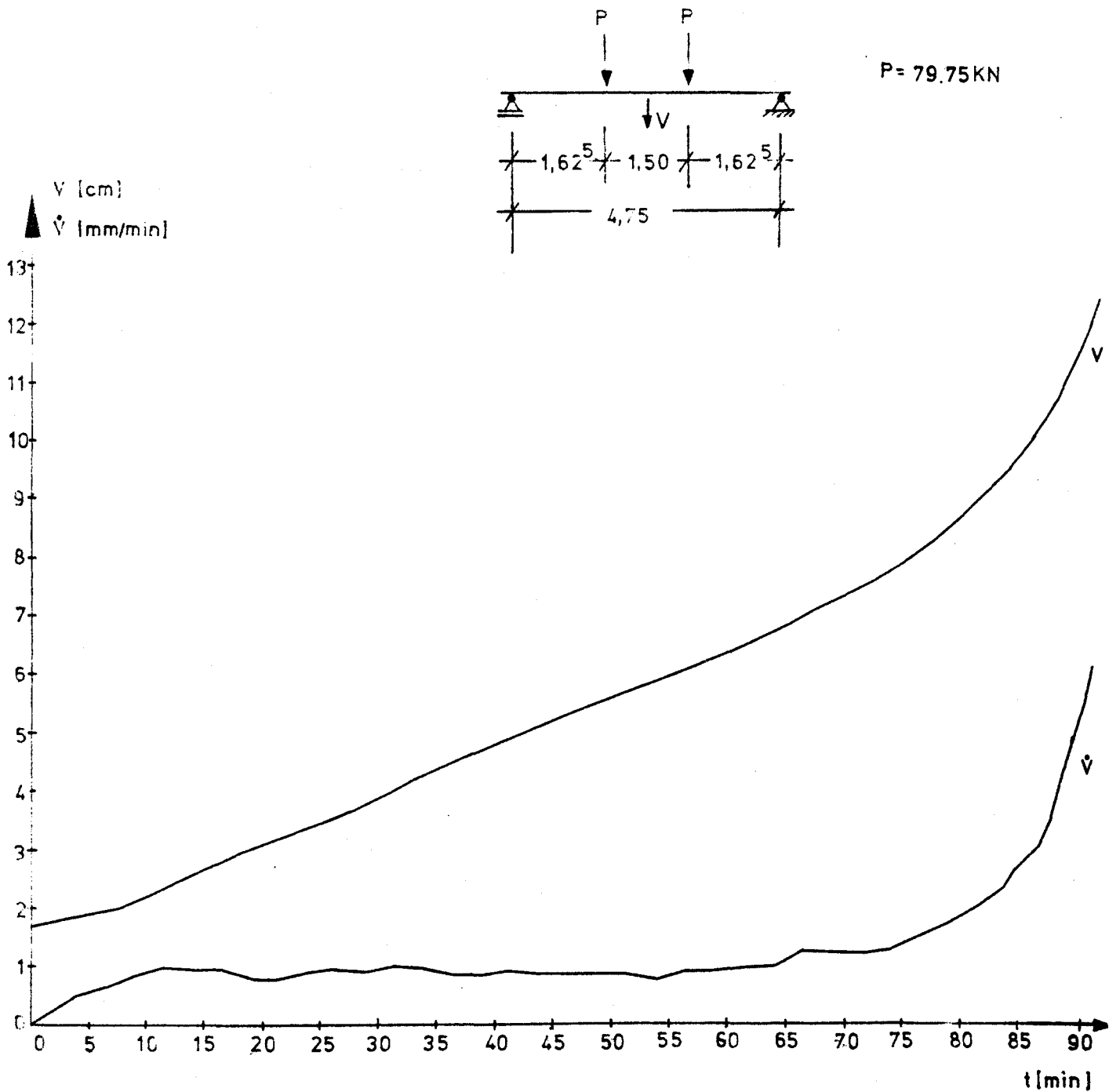
Anlage  
2.3.2.0



DURCHBIEGUNG

DURCHBIEGUNGSGESCHWINDIGKEIT

BALKEN SB-2



STABBÜNDEL IM BRAND

Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz

Technische Universität Braunschweig

Anlage

2.3.2.q

